

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

DANILO BARBOSA  
DIEGO SOUZA PEREIRA  
RAFAEL WIELER

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROTÓTIPOS DE SISTEMAS DE  
ILUMINAÇÃO RESIDENCIAL FLUORESCENTE E LED  
ALIMENTADOS POR SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2013

DANILO BARBOSA  
DIEGO SOUZA PEREIRA  
RAFAEL WIELER

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROTÓTIPOS DE SISTEMAS DE  
ILUMINAÇÃO RESIDENCIAL FLUORESCENTE E LED  
ALIMENTADOS POR SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica – do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves

CURITIBA  
2013

Danilo Barbosa  
Diego Souza Pereira  
Rafael Wieler

## **Análise Comparativa de Protótipos de Sistemas de Iluminação Residencial Fluorescente e LED Alimentados por Sistema Fotovoltaico Isolado**

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 09 de Abril de 2013.

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr.  
Coordenador de Curso  
Engenharia Elétrica

---

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Mestre  
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso  
de Engenharia Elétrica do DAELT

### **ORIENTAÇÃO**

---

Gilberto Manoel Alves, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Gilberto Manoel Alves, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jair Urbanetz Junior, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ivan Azevedo Cardoso, Phd.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é resultado foi realizado devido a muitas pessoas que colaboraram direta e indiretamente com sua finalização as quais devemos nossa eterna gratidão.

Contudo, gostaríamos de agradecer aos colaboradores do LACTEC que nos sederam os módulos fotovoltaicos para a realização deste trabalho, bem como deram apoio ao incentivar sua construção.

Agradecemos ao professor Jair Urbanetz Junior, que em apoio a este trabalho, nos auxiliou nos momentos mais complicados e difíceis desta etapa, bem como o professor Gilberto Manoel Alves e o professor Ivan Azevedo Cardoso, que por meio de suas opiniões e conselhos nos permitiu enriquecer nosso conhecimento e o conteúdo do presente trabalho.

Somos eternamente gratos também aos nossos amigos e colegas do curso de engenharia, que mais do que amigos, agora podem ser chamados de camaradas.

Agradecemos também aos nossos pais, que nos deram o dom da vida e esperamos que este momento sirva de alguma forma como retribuição.

## RESUMO

BARBOSA, Danilo; PEREIRA, Diego S.; WIELER, Rafael. Análise comparativa de protótipos de sistemas de iluminação residencial fluorescente e LED alimentados por sistema fotovoltaico isolado. 2013. 291 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

O presente trabalho aborda dois estudos que foram analisados paralelamente durante seu desenvolvimento. Realizou-se dois dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos isolados aplicados como fonte de alimentação para o circuito de iluminação residencial, apenas. O outro estudo, abrange a comparação de lâmpadas fluorescentes com as lâmpadas LEDs, quando aplicadas em uma residência, seguindo o dimensionamento por normas brasileiras específicas. No caso das lâmpadas LEDs, ainda não há normatização definida para os dimensionamentos luminotécnicos residenciais. Por este motivo, elaborou-se primeiramente um projeto luminotécnico para as lâmpadas fluorescentes, respeitando normas brasileiras de projeto. Por conseguinte, adotou-se como critério de dimensionamento o parâmetro dos fluxos luminosos das lâmpadas, sendo um fator comum entre a escolha das lâmpadas LEDs e fluorescentes, procurando lâmpadas com as especificações que mais se assemelham às fluorescentes, principalmente quanto ao fluxo luminoso, IRC (Índice de Reprodução de Cor), Temperatura de Cor, e ainda, com melhor espalhamento possível da luz no ambiente. Após a escolha das lâmpadas, tanto das LEDs quanto das fluorescentes, foram realizadas as previsões de cargas para os dois circuitos de iluminação propostos para a residência, servindo de base para os dimensionamentos fotovoltaicos, sendo independente um do outro. O objetivo em questão, se trata de evidenciar o sistema fotovoltaico, que aplicado à iluminação com lâmpadas LEDs ou fluorescentes, trazem melhores benefícios energéticos e financeiros na sua implantação em uma residência. Para efeitos de estudo, escolheu-se uma casa situada em Piraquara - PR, que no momento do desenvolvimento deste trabalho se encontrou com algumas pendências em serviços de construção civil. Após serem levantados os parâmetros necessários para os dimensionamentos fotovoltaicos, como níveis de radiação do local estimado anualmente e previsão de cargas do circuito de iluminação em estudo, desenvolveu-se um protótipo para fins de representação de uma amostragem dos ensaios dos dois projetos fotovoltaicos, um para aplicação na iluminação da residência constituídos por lâmpadas fluorescentes, e o outro, aplicado para lâmpadas LEDs. Como amostragem, escolheu-se um dos cômodos da residência. Desta forma, foram verificados os parâmetros luminotécnicos, como medições de iluminâncias e verificação do espalhamento da luz no ambiente, procedimentos que foram seguidos por norma brasileira. Paralelamente, foram aquiritados dados do comportamento diário dos parâmetros elétricos envolvidos com os protótipos de sistemas fotovoltaicos, tais como tensões e correntes de entrada no inversor, controlador de carga, dentre outros. Finalmente, após constatar o funcionamento correto dos protótipos desenvolvidos, foram analisados os dados obtidos por meio de gráficos e, finalmente, analisados os benefícios energéticos e os custos para implantação do melhor sistema fotovoltaico isolado quando aplicado na iluminação residencial.

**Palavras-chave:** Sistema Fotovoltaico Isolado; Lâmpadas Fluorescentes; Lâmpadas LEDs; Projeto Luminotécnico.

## ABSTRACT

BARBOSA, Danilo; PEREIRA, Diego S.; WIELER, Rafael. Comparative analysis of prototype of residential lighting system fluorescent and LED powered by isolated photovoltaic system. 2013. 291 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

This present work discusses two studies that were analyzed in parallel during its development. Two design of photovoltaic isolated systems was held applied as the power source for the residential lighting circuit only. The other study, includes a comparison between fluorescent lamps with LED lamps applying its in a residence, sizing through specific brazilian standards. In the case of LEDs, there are no standards for implementation the residential luminotechnical projects. For this reason, it was prepared primarily a luminotechnical project for fluorescent lamps, according to brazilian standards. Therefore, it was adopted as a criterion for the sizing parameter of the lamps's luminous flux, being a common factor between the choose LED lamps and fluorescent lamps with looking over the specifications that resemble to fluorescent, especially about the lamps's luminous flux, colour rendering index (CRI), colour temperature, and also, with the best possible scattering of light on areas inside the residence. After the lamps being chosen, both the LEDs as the fluorescent it was made the load forecasting for both residential lighting circuit proposed, providing the basis for the photovoltaic dimensioning being independent of each other. The main objective it is evident the photovoltaic system, which applied to lighting circuit with LEDs or fluorescent lamps, bring better energy and financial benefits in their implementation in a residence. For study effects, it was chosen a house situated in Piraquara city, in Parana state, which in this time of the development of this work it was with some backlog in civil construction services. After being determined the necessary parameters for photovoltaic systems dimensioning, as local solar radiation levels estimates annually and forecasting loads of lighting circuit among the study, it was developed a prototype representing a sampling test of the two photovoltaic projects, one for being applied to lighting of the residence consist of fluorescent lamps, and the other one applied to LED lamps. As sampling was chosen one of the rooms of the residence. Thus, the luminotechnical parameters were checked, like the measurements of illuminances verification of scattering of light in the room, procedures that were done according to brazilian standards. In Parallel, data were registered for the daily behavior of electrical parameters involved with the prototypes of photovoltaic systems, such as voltage and current input to the inverter, charge controller, among others. Finally, after evidencing the correct functioning of the prototypes developed, it was analyzed the data through charts as well as the analysis of the energy benefits and costs to implement the best photovoltaic system applied in isolated residential lighting.

**Keywords:** Isolated Photovoltaic System; Fluorescent Lamps; LED Lamps; Luminotechnical Project.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - População mundial: 1950 - 2050.....	24
Figura 2 - Custos históricos de módulos de c-Si, valores corrigidos a valores de mar/2012.....	29
Figura 3 - Custo total de implantação de sistemas fotovoltaicos isolados. ....	30
Figura 4 – Efeito Fotovoltaico.....	34
Figura 5 - Semicondutor tipo-N, tipo-P e o Campo Elétrico. ....	35
Figura 6 - Célula de Silício Monocristalino .....	36
Figura 7 - Célula de Silício Policristalino. ....	37
Figura 8 - Exemplos de módulos solares fotovoltaicos flexíveis, de silício amorfo hidrogenado em substrato plástico.....	38
Figura 9 - Célula do tipo CdTe. ....	39
Figura 10 - Célula do tipo CIS e CGIS.....	39
Figura 11 - Hierarquia Fotovoltaica. ....	40
Figura 12 - Conexão das células em série. ....	40
Figura 13 - Representação das curvas IV relativas à associação em série de três módulos fotovoltaicos.....	41
Figura 14 - Conexão das células em paralelo. ....	42
Figura 15 - Representação das curvas IV relativas à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos.....	42
Figura 16 - Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com diodos de <i>bypass</i> e de bloqueio. ....	43
Figura 17 - Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino, normalizada pela corrente de curto-circuito.....	45
Figura 18 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício monocristalino da Figura 17. ....	45
Figura 19 - Parâmetros de potência máxima.....	46
Figura 20 - Efeito causado pela variação da intensidade da luz na curva característica IxV para um módulo fotovoltaico. ....	47
Figura 21 - Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica IxV (para 1000 W/m <sup>2</sup> ) em um módulo fotovoltaico de silício cristalino. ....	48

Figura 22 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°.....	50
Figura 23 – Indicação dos ângulos notáveis em energia solar.....	52
Figura 24 - O espectro de irradiância da radiação solar no topo da atmosfera (linha sólida) e ao nível do mar (sombreado), em comparação com o espectro de irradiância de um corpo negro (linha tracejada).....	53
Figura 25 - Componentes da radiação solar ao nível do solo.....	54
Figura 26 - Radiação solar global horizontal: média anual.....	57
Figura 27 - Radiação solar global diária: médias sazonais.....	58
Figura 28 - Bateria de Bagdá .....	60
Figura 29 - Pilha de Volta.....	60
Figura 30 – Bateria Chumbo Ácido.....	65
Figura 31 - Curvas Típicas do Efeito da Profundidade da Descarga e Temperatura sobre a vida útil da bateria.....	70
Figura 32 - Banco de Baterias 12x 220 Ah na Pousada Solar dos Ventos (Fernando de Noronha).....	71
Figura 33 - Estados de operação de um controlador de carga.....	79
Figura 34 - Controlador de carga PWM com LVD opcional.....	84
Figura 35 – Controlador de carga PWM <i>Shunt</i> com LVD opcional.....	85
Figura 36 - Formas de onda típicas de inversores monofásicos.....	87
Figura 37 - Espectro eletromagnético.....	91
Figura 38 - Curva de sensibilidade do olho humano a radiações monocromáticas.....	92
Figura 39 - Curva de distribuição luminosa (CDL) e os planos de corte.....	95
Figura 40 - Diferentes exemplos de LEDs de baixa potência.....	109
Figura 41 - Exemplo de LED de Alta Potência (1 W) com Dissipador Hexagonal de Alumínio.....	110
Figura 42 - Visão frontal da residência em construção.....	117
Figura 43 - Radiação solar diária [kWh/m <sup>2</sup> ] - inclinada 35° e orientada 47° ao leste - para Piraquara.....	141
Figura 44 - Circuito final do sistema fotovoltaico para os circuitos de iluminação fluorescente e LED da residência.....	160
Figura 45 - Curva de distribuição luminosa para lâmpadas compactas fluorescentes - 2U/3U.....	166

Figura 46 - Curva de distribuição luminosa - EnduraLED A19 bulb. ....	167
Figura 47 - Circuito final do sistema fotovoltaico para os circuitos de iluminação fluorescente e LED do protótipo. ....	185
Figura 48 - Área regular com luminária central.....	186
Figura 49 - Planta baixa do quarto – ambiente de realização do ensaio - com as divisões em áreas de (25 x 25) cm.....	187
Figura 50 - Circuito de leitura de corrente. ....	189
Figura 51 - Circuito de leitura de tensão.....	190
Figura 52 - Planta baixa do quarto com as divisões em linhas e colunas. ....	200
Figura 53 - Valores de iluminância no Quarto 1 - Lâmpadas fluorescentes.....	201
Figura 54 - Valores de iluminância no Quarto 1 - Lâmpadas LED.....	201
Figura 55 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas fluorescentes - Vista nordeste.....	202
Figura 56 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas LED - Vista nordeste.....	202
Figura 57 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas fluorescentes - Vista sudoeste.....	203
Figura 58 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 – lâmpadas LED - Vista sudoeste.....	203
Figura 59 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 21° dia - lâmpadas fluorescentes .....	210
Figura 60 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 21° dia - lâmpadas fluorescentes.....	212
Figura 61 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 22° dia - lâmpadas fluorescentes.....	214
Figura 62 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 22° dia - lâmpadas fluorescentes .....	216
Figura 63 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 23° dia - lâmpadas fluorescentes.....	217
Figura 64 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 23° dia - lâmpadas fluorescentes.....	218
Figura 65 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 24° dia - lâmpadas fluorescentes.....	220

Figura 66 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 24° dia - lâmpadas fluorescentes. ....	221
Figura 67 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 15° dia - lâmpadas LED. ....	223
Figura 68 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 15° dia - lâmpadas LED. ....	226
Figura 69 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 16° dia - lâmpadas LED. ....	228
Figura 70 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 16° dia - lâmpadas LED. ....	230
Figura 71 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 17° dia - lâmpadas LED. ....	231
Figura 72 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 17° dia - lâmpadas LED. ....	232
Figura 73 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 18° dia - lâmpadas LED. ....	234
Figura 74 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 18° dia - lâmpadas LED. ....	235
Figura 75 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 19° dia - lâmpadas LED. ....	237
Figura 76 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 19° dia - lâmpadas LED. ....	239
Figura 77 - Gráfico da composição dos custos do sistema fluorescente. ....	241
Figura 78 - Gráfico da composição dos custos do sistema LED. ....	242
Figura 79 - Visão do Quarto 1 sob ensaio lâmpadas LED- vista sudeste. ....	259
Figura 80 - Visão do Quarto 1 sob ensaio lâmpadas LED- vista sudoeste. ....	259
Figura 81 - Painel fotovoltaico instalado no telhado da residência. ....	260
Figura 82 - Suporte construído para as lâmpadas e sua disposição - Lâmpadas LED (a) desligadas e (b) ligadas. ....	260
Figura 83 - Suporte com as lâmpadas fluorescentes. ....	261
Figura 84 - Vista frontal do lay out dos equipamentos. ....	261
Figura 85 - (a) Placas do circuito de coleta de dados (b) Arduino. ....	262
Figura 86 - Visão geral do mecanismo de coleta de dados e comutação. ....	262

Figura 87 - Visão da interface do programa de monitoramento do sistema fotovoltaico.....	263
Figura 88 - Formas de onda da corrente e da tensão com o inversor (a) fluorescentes e (b) LED. ....	264
Figura 89 - Formas de onda da corrente e da tensão com a rede (a) fluorescentes e (b) LED. ....	264
Figura 90 – FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 50 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED. ....	265
Figura 91 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 50 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.....	265
Figura 92 – FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 250 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED. ....	266
Figura 93 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 250 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.....	266
Figura 94 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 1,25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.....	267
Figura 95 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 1,25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED. ....	267
Figura 96 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.....	268
Figura 97 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED. ....	268
Figura 98 - Especificações luminária 3740.....	273
Figura 99 - Especificações luminária Rubi .....	273
Figura 100- Ponto de congelamento do eletrólito da bateria. ....	283
Figura 101 - Taxa de auto-descarga. ....	284
Figura 102 - Curva característica I x V do Módulo Fotovoltaico HM-45D12 à 45 °C. ....	286
Figura 103 - Curva de resposta espectral do luxímetro utilizado. ....	288

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Brasil – Consumo de eletricidade na rede (GWh).....	26
Tabela 2 - Previsão de carga dos circuitos de iluminação e quantidade de pontos de luz originalmente projetados. ....	119
Tabela 3 - Coeficientes de reflexão - Pavimento térreo.....	121
Tabela 4 - Coeficientes de reflexão - Pavimento superior. ....	122
Tabela 5 - Características dos cômodos .....	123
Tabela 6 - Fatores determinantes da iluminâncias considerados para as varandas e projeções das varandas. ....	125
Tabela 7 - Características procuradas da iluminação.....	126
Tabela 8 - Luminárias e fluxo luminoso necessário por cômodo. ....	128
Tabela 9 - Projeto luminotécnico da residência - Características dos cômodos .....	130
Tabela 10 - Projeto luminotécnico da residência - Características da iluminação e luminárias .....	131
Tabela 11 - Projeto luminotécnico da residência – Especificações das lâmpadas fluorescentes escolhidas.....	132
Tabela 12 - Projeto luminotécnico da residência – Especificações dos reatores escolhidos.....	133
Tabela 13 - Projeto luminotécnico da residência – Cálculo de controle e de consumo da instalação - Fluorescentes .....	134
Tabela 14 - Projeto luminotécnico da residência – Especificações das lâmpadas LED escolhidas.....	135
Tabela 15 - Projeto luminotécnico da residência – Cálculo de controle e de consumo da instalação - LED.....	136
Tabela 16 - Carga de iluminação total instalada na residência - Fluorescente e LED. ....	137
Tabela 17 - Quadro geral de previsão de cargas para os dois projetos.....	139
Tabela 18 - Irradiação incidente no plano horizontal em Piraquara (Lat. -25,42°; Long. -49,08°). ....	140
Tabela 19 - Irradiação incidente - plano inclinado 35° e orientado 47° leste - em Piraquara (Lat. -25,42°; Long. -49,08°). ....	141

Tabela 20 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação fluorescente. ....	145
Tabela 21 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação LED. ....	155
Tabela 22 - Resumo Comparativo dos Dimensionamentos dos Bancos de Baterias - LED e fluorescente.....	161
Tabela 23 - Características físicas e de iluminação - Quarto 1 .....	163
Tabela 24 - Características das lâmpadas - Projeto luminotécnico teórico do quarto 1. ....	164
Tabela 25 - Fator de utilização e fluxo luminoso necessário recalculado para o protótipo.....	168
Tabela 26 - Características das lâmpadas - Projeto luminotécnico prático do quarto 1. ....	169
Tabela 27 - Quadro de previsão de cargas do protótipo.....	170
Tabela 28 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação fluorescente. ....	174
Tabela 29 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação LED. ....	179
Tabela 30 - Resumo comparativo dos dimensionamentos da bateria do protótipo - LED e fluorescente.....	184
Tabela 31 - Potência de iluminação instalada para as duas tecnologias.....	193
Tabela 32 - Densidades de potência e de potência relativa por cômodo e suas reduções com o uso da tecnologia LED.....	196
Tabela 33 - Relação da eficiência luminosa com a densidade de potência relativa. ....	198
Tabela 34 - Resultados da verificação da iluminância para os sistemas de iluminação.....	204
Tabela 35 - Valores teóricos e experimentais da iluminação - protótipo.....	205
Tabela 36 - Levantamento de Custos Estimados para o Sistema Fotovoltaico Aplicado na Iluminação com Lâmpadas Fluorescentes.....	240
Tabela 37 - Levantamento de Custos Estimados para o Sistema Fotovoltaico Aplicado na Iluminação com Lâmpadas LED .....	241

Tabela 38 - Comparativo dos Custos dos Sistemas Fotovoltaicos Aplicados nos Sistemas LED e Fluorescente .....	242
Tabela 39 - Comparativo dos Custos com Iluminação entre os Sistemas LED e Fluorescente .....	243
Tabela 40 - Comparativo de Quantidades e Preços Totais das Lâmpadas .....	244
Tabela 41 - Comparativo de Quantidades e Preços Totais das Luminárias .....	244
Tabela 42 - Comparativo de Quantidades e Preços Totais das Baterias.....	245
Tabela 43 – Especificações do painel fotovoltaico usado para os sistemas fotovoltaicos de iluminação fluorescente e LED .....	274
Tabela 44 - Especificações do controlador de carga usado para os sistemas fotovoltaicos de iluminação fluorescente e LED .....	274
Tabela 45 - Especificações do inversor usado para os sistemas fotovoltaicos de iluminação fluorescente e LED.....	275
Tabela 46 - Especificações da lâmpada LED de 12,5 W usada no projeto de iluminação LED.....	275
Tabela 47 - Especificações da lâmpada LED de 9 W usada no projeto de iluminação LED.....	276
Tabela 48 - Especificações da lâmpada LED de 22 W usada no projeto de iluminação LED.....	276
Tabela 49 - Especificações da lâmpada fluorescente de 42 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	277
Tabela 50 - Especificações da lâmpada fluorescente de 14 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	277
Tabela 51 - Especificações da lâmpada fluorescente de 18 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	278
Tabela 52 - Especificações da lâmpada fluorescente de 32 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	278
Tabela 53 - Especificações da lâmpada fluorescente de 11 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	279
Tabela 54 - Especificações da lâmpada fluorescente de 27 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	279
Tabela 55 - Especificações da lâmpada fluorescente de 20 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	280

Tabela 56 - Especificações da lâmpada fluorescente de 23 W usada no projeto de iluminação fluorescente. ....	280
Tabela 57 - Especificações do reator usado no projeto luminotécnico fluorescente para as lâmpadas de 32 W. ....	281
Tabela 58 - Especificações da bateria usada para o sistema fotovoltaico de iluminação LED.....	282
Tabela 59 - Especificações da bateria usada para o sistema fotovoltaico de iluminação fluorescente .....	282
Tabela 60 - Especificações da bateria usada para os protótipos ensaiados.....	283
Tabela 61 - Especificações do painel fotovoltaico utilizado no protótipo. ....	285
Tabela 62 - Especificações das lâmpadas utilizadas nos protótipos. ....	286
Tabela 63 - Especificações do controlador de carga utilizado.....	287
Tabela 64 - Especificações do inversor utilizado no protótipo. ....	288
Tabela 65 - Especificações do luxímetro utilizado.....	289

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Iluminância por classe de tarefas visuais. ....	271
Quadro 2 - Fatores determinantes da iluminância adequada. ....	272

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CDL	Curva de Distribuição Luminosa
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e EólicaSérgio de Salvo Brito
Fd	Fator de Depreciação
Fu	Fator de Utilização
IRC	Índice de Reprodução de Cor
LED	Diodo Emissor de Luz ( <i>Light Emitting Diode</i> )
LVD	Tensão mínima de desconexão
MPPT	Seguidor do Ponto de Máxima Potência ( <i>Maximum Power Point Tracker</i> )
PWM	Modulação de largura de pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
RGB	Vermelho, verde e azul (Red, Green and Blue)
SMD	<i>Surface-Mount Form Factor</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

## LISTA DE SIMBOLOS

$\eta$	Eficiência
$\delta$	Declinação Solar
$\theta$	Ângulo de incidência
$\gamma$	Ângulo azimutal de uma superfície
$\gamma_s$	Ângulo azimutal do Sol
$\alpha$	Elevação ou altura solar
$\beta$	Inclinação de uma superfície
$\omega$	Ângulo horário solar
$\theta_z$	Ângulo zenital
$\Phi$	Fluxo luminoso
$\varphi$	Fluxo luminoso por lâmpada
$\rho$	Coefficiente de Reflexão
$\eta_L$	Eficiência da luminária
$\eta_R$	Eficiência do recinto.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	24
1.1	TEMA .....	24
1.1.1	Delimitação do Tema.....	24
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS .....	26
1.3	OBJETIVOS .....	27
1.3.1	Objetivo Geral .....	27
1.3.2	Objetivos Específicos .....	27
1.4	JUSTIFICATIVA .....	28
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	31
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	33
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	34
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	34
2.1.1	Efeito Fotovoltaico.....	34
2.1.2	Tipos de Células Fotovoltaicas.....	35
2.1.2.1	Silício Monocristalino .....	35
2.1.2.2	Silício Policristalino .....	36
2.1.2.3	Silício Amorfo Hidrogenado .....	37
2.1.2.4	Telureto de Cádmio (CdTe) .....	38
2.1.2.5	Disseleneto de Cobre (gálio) e Índio (CIS e CIGS) .....	39
2.1.3	Módulos Fotovoltaicos.....	40
2.1.3.1	Tipos de Arranjos.....	40
2.1.3.2	Características Elétricas dos Módulos .....	44
2.1.3.3	Fatores que Afetam as Características Elétricas dos Módulos.....	47
2.1.4	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos .....	48
2.1.5	Radiação Solar .....	49
2.1.5.1	Radiação Solar ao Nível do Solo .....	54
2.1.6	Mapas Solarimétricos .....	56

2.2	BATERIAS .....	59
2.2.1	Breve Histórico .....	59
2.2.2	Classificações das Baterias.....	61
2.2.2.1	Classificações Quanto a Reusabilidade .....	61
2.2.2.2	Classificações Funcionais .....	62
2.2.2.3	Classificações Construtivas .....	62
2.2.3	Principais Baterias Secundárias Utilizadas .....	63
2.2.3.1	Bateria cádmio/óxido de níquel (níquel/cádmio).....	63
2.2.3.2	Bateria Chumbo-Ácido.....	63
2.2.3.3	Terminologia de Baterias .....	65
2.2.4	Banco de Baterias .....	71
2.2.4.1	Dimensionamento do Acumulador de Energia .....	72
2.2.5	Características Ideais para Uso em Sistemas Fotovoltaicos.....	77
2.3	CONTROLADORES DE CARGA .....	78
2.3.1	Bloqueio de Corrente Reversa .....	79
2.3.2	Prevenção de Sobrecarga das Baterias .....	80
2.3.3	<i>Set Points</i> x Temperatura .....	81
2.3.4	<i>Set Points</i> x Tipo de Bateria .....	82
2.3.5	Tensão Mínima de Desconexão (LVD) .....	82
2.3.6	Proteção contra Sobrecargas .....	83
2.3.7	Dimensionamento do Controlador de Carga.....	83
2.3.8	Tipos de Controladores de Carga.....	84
2.4	INVERSORES .....	85
2.4.1	Qualidade de Energia.....	86
2.4.2	Eficiência.....	87
2.4.3	Desligamento automático .....	87
2.4.4	Características como carregador de baterias .....	88
2.4.5	Expansão de capacidade .....	89
2.4.6	Cargas fantasmas .....	89

2.4.7	Proteções .....	89
2.4.8	Fator de potência .....	90
2.4.9	Taxa de utilização .....	90
2.5	LUMINOTÉCNICA.....	91
2.5.1	A luz e a visão .....	91
2.5.2	Conceitos luminotécnicos .....	92
2.5.2.1	Fluxo luminoso ( $\varphi$ ).....	92
2.5.2.2	Intensidade luminosa (I).....	92
2.5.2.3	Iluminância (E).....	93
2.5.2.4	Coeficiente de Reflexão ( $\rho$ ).....	93
2.5.2.5	Luminância (L).....	93
2.5.2.6	Curva de distribuição luminosa (CDL).....	94
2.5.3	Temperatura de Cor (T).....	95
2.5.4	Índice de Reprodução de Cor (IRC) .....	96
2.5.5	Eficiência Energética .....	96
2.5.6	Fundamentos do Projeto Luminotécnico.....	96
2.6	LÂMPADAS FLUORESCENTES.....	104
2.6.1	Funcionamento.....	104
2.6.2	Tipos de lâmpadas fluorescentes .....	105
2.6.3	Descarte de lâmpadas fluorescentes.....	106
2.7	A TECNOLOGIA LED.....	107
2.7.1	História .....	107
2.7.2	Conceitos Básicos.....	108
2.7.3	LEDs de Baixa Potência.....	109
2.7.4	LEDs de Alta Potência.....	110
2.7.5	Análise Térmica.....	111
2.7.6	Economia .....	112
2.7.7	Consumo.....	112
2.7.8	Vida Útil.....	113

2.7.9	Descarte e Sustentabilidade .....	113
2.7.10	Qualidade de Luz .....	114
2.7.11	Direção da Luz .....	115
3	METODOLOGIA.....	117
3.1	A RESIDÊNCIA EM ESTUDO .....	117
3.2	O PROJETO LUMINOTÉCNICO TEÓRICO DA RESIDÊNCIA .....	120
3.2.1	Características dos cômodos .....	121
3.2.2	Características da iluminação.....	124
3.2.3	Luminárias e lâmpadas .....	126
3.3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	137
3.3.1	Dimensionamento do sistema fotovoltaico aplicado na iluminação com lâmpadas fluorescentes .....	142
3.3.1.1	Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298)....	144
3.3.2	Dimensionamento do sistema fotovoltaico aplicado na iluminação com lâmpadas LED .....	151
3.3.2.1	Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298)....	154
3.4	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	161
3.4.1	O ambiente de ensaio – Quarto 1.....	162
3.4.2	Adequação do projeto luminotécnico para o protótipo .....	165
3.4.3	Dimensionamento do sistema fotovoltaico para o protótipo.....	169
3.4.3.1	Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298) – Protótipo para o sistema de iluminação fluorescente .....	173
3.4.3.2	Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298) – Sistema de iluminação LED .....	178
3.4.4	Método de Medição das Iluminâncias.....	185
3.4.5	Monitoramento do sistema fotovoltaico.....	187
4	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	192
4.1	COMPARAÇÃO DOS PROJETOS LUMINOTÉCNICOS TEÓRICOS .....	192
4.2	VERIFICAÇÃO DA ILUMINÂNCIA .....	198
4.3	COMPORTAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	206

4.3.1	Comportamento do sistema fotovoltaico para a iluminação fluorescente.....	208
4.3.2	Comportamento do sistema fotovoltaico para a iluminação LED .....	222
4.4	ANÁLISE DE CUSTOS .....	240
5	CONCLUSÃO.....	246
	REFERÊNCIAS .....	249
	APÊNDICES .....	259
	ANEXOS.....	269

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

### 1.1.1 Delimitação do Tema

O aumento populacional observado nas últimas décadas, somado ao desenvolvimento tecnológico, social e econômico mundial, apontam um cenário de contínuo aumento do consumo de energia e da necessidade de melhor aproveitamento da mesma. A projeção para esse crescimento nas próximas décadas está representada conforme a Figura 1.

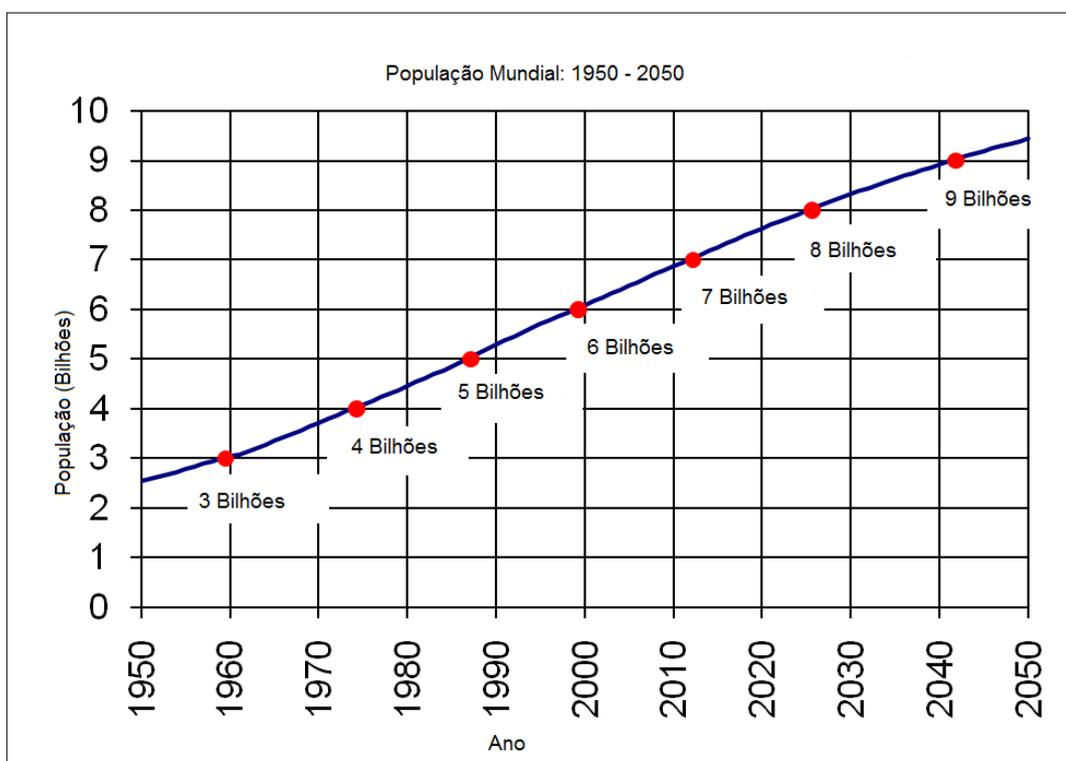


Figura 1 - População mundial: 1950 - 2050.  
Fonte: Adaptado de U. S. Census Bureau (2011).

Partindo desse contexto, intensificou-se o uso e a pesquisa de diversas fontes alternativas de energia, como por exemplo, a energia solar, que é uma fonte renovável e limpa. Uma das formas de se aproveitar a energia solar, se dá através

de painéis solares que absorvem a radiação solar, convertendo-a diretamente em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico.

Segundo o Instituto Técnico de Lisboa (2011), o estudo da energia solar se desenvolveu a partir dos experimentos de Alexandre Edmond Becquerel, que em 1839, descobriu por acaso que placas de prata ou de platina quando imersas em um eletrólito e expostas à luz geravam uma pequena diferença de potencial. A isto, foi dado o nome de “efeito fotovoltaico”. Já em 1884, Charles Fritts construiu a primeira célula fotovoltaica usando selênio, porém esta possuía um baixíssimo rendimento de aproximadamente 1 %.

Outra tecnologia presente nos dias atuais é a dos LEDs (*Light Emitting Diode*), os quais estão aos poucos substituindo as tradicionais lâmpadas incandescentes.

Rangel, Silva e Guede (2009), afirmam:

Esse tipo de iluminação pode ser descrito como o terceiro estágio na evolução da lâmpada elétrica. O primeiro, representado pela lâmpada incandescente desenvolvida pelo americano Thomas Edison, pouco mudou nos últimos 128 anos. O mesmo filamento incandescente continua a ser utilizado até hoje. A segunda fase, iniciada nos anos 30, é a do uso das fluorescentes. Estas geram luz a partir de uma mistura de gases num tubo revestido de fósforo. Mais econômicas, elas já substituíram as incandescentes em grandes ambientes [...].

Atualmente, existe um grande esforço para que os LEDs passem também a tomar mais corpo na área de iluminação. No entanto, devido principalmente a uma falta de compreensão dos pontos positivos e negativos desta tecnologia, bem como seu mau uso ou aplicação incorreta, ainda existem algumas barreiras ao crescimento deste novo tipo de iluminação (HALCO LIGHTING TECHNOLOGIES, 2010).

Nesse cenário, o trabalho a ser desenvolvido abordará o estudo e o projeto de um sistema fotovoltaico aplicado em circuito de iluminação.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O crescimento populacional e econômico brasileiro, dentre outros fatores, proporcionou um aumento considerável do consumo de energia elétrica.

A projeção do consumo de energia elétrica do Brasil, desagregado por classe de consumo, prevê um aumento de 54,7 % no total para o período de 2008 a 2018, conforme é visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Brasil – Consumo de eletricidade na rede (GWh).

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
2008	94.746	180.049	61.813	56.079	392.688
2009	100.263	166.470	64.962	56.293	387.988
2010	105.538	182.338	69.223	58.766	415.865
2011	110.678	193.225	73.359	61.194	438.456
2012	115.907	203.085	77.899	63.614	460.505
2013	121.278	214.353	82.716	66.124	484.470
2014	126.787	223.456	87.825	68.724	506.791
2015	132.439	232.348	93.244	71.422	529.452
2016	138.238	243.192	98.991	74.223	554.644
2017	144.192	254.010	105.092	77.134	580.427
2018	150.297	265.311	111.562	80.159	607.328
Variação (% ao ano)					
2008-2013	5,1	3,5	6,0	3,4	4,3
2013-2018	4,4	4,4	6,2	3,9	4,6
2008-2018	4,7	4,0	6,1	3,6	4,5

Fonte: EPE (2009, p. 71).

Para suprir essa crescente demanda de energia, o sistema elétrico brasileiro deve estar preparado estruturalmente para que haja expansão do mesmo. Essa expansão torna-se ainda mais relevante quando se trata do planejamento para os horários de ponta, que devido ao excesso de carga, pode comprometer todo ou parte do sistema. Desta forma, faz-se necessário uma busca de novas fontes de energia que possibilitem a redução da demanda.

A iluminação pode chegar até 15 % do consumo de energia residencial, sendo uma porcentagem significativa na fatura de energia elétrica. Este consumo tem maior efeito nesta realidade do que em outros segmentos como o setor industrial, por exemplo, onde o percentual de energia consumida com a iluminação é inferior (FRACCHETTA, 2012).

Conforme Daniel Serrano (2009), o trabalho de recolhimento e tratamento realizado para a reciclagem das lâmpadas convencionais (incandescentes e fluorescentes) é perigoso, além de ser prejudicial à natureza, devido principalmente a existência de substâncias tóxicas, tais como o mercúrio, nas lâmpadas fluorescentes.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Comparar dois protótipos de sistemas de iluminação residencial fluorescente e LED alimentados por sistema fotovoltaico isolado para a região metropolitana de Curitiba.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre iluminação, característica das lâmpadas fluorescentes e LEDs, painéis fotovoltaicos, inversores, controladores de carga e baterias;
- Realizar o projeto luminotécnico e previsão de cargas de iluminação de uma residência em fase de construção, com lâmpadas fluorescentes;
- Realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado da rede elétrica para alimentação do circuito de iluminação com lâmpadas fluorescentes. Calcular os parâmetros de inversores, controladores de carga, baterias e painéis fotovoltaicos para tal sistema;

- Pesquisar lâmpadas LEDs que apresentem características e parâmetros similares às lâmpadas fluorescentes escolhidas no projeto luminotécnico;
- Realizar novo projeto luminotécnico e previsão de cargas de iluminação da mesma residência, porém com as lâmpadas LEDs escolhidas;
- Realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado da rede elétrica para alimentação do circuito de iluminação com as lâmpadas LEDs. Recalcular os parâmetros de inversores, controladores de carga, baterias e painéis fotovoltaicos para o novo sistema;
- Dimensionar, construir e ensaiar protótipos dos sistemas fotovoltaicos, um com lâmpadas LED e outro com lâmpadas fluorescentes, para representar uma amostragem (um dos cômodos da residência) do sistema completo, a fim de avaliar o desempenho dos dois sistemas na prática, comparando-os.
- Coletar dados experimentais de ambos os sistemas;
- Analisar o custo benefício energético e financeiro.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A luz solar pode ser vista como uma fonte de energia inesgotável, a qual chega à superfície terrestre, podendo ser aproveitada por meio da conversão em energia elétrica, possibilitada pela tecnologia fotovoltaica (DOMOSOLAR, 2011).

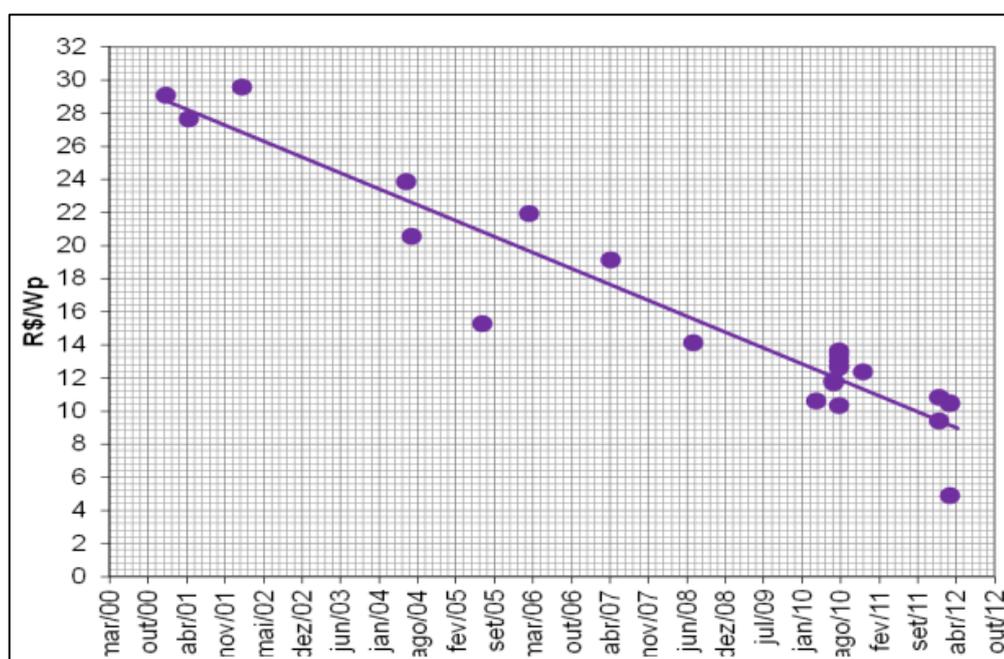
Os painéis fotovoltaicos são equipamentos que, por possuírem uma estrutura estática, não necessitam da intervenção humana e praticamente não carecem de manutenção, além de não usarem combustíveis. Desta forma, sob o ponto de vista operacional, é uma fonte de energia barata. Uma das principais vantagens da tecnologia fotovoltaica está em seu cunho ecológico, caracterizando-se como fonte de energia limpa e renovável (PAINÉIS FOTOVOLTAICOS, 2012).

De acordo com Satvez (2011), “O tempo de vida útil dos painéis fotovoltaicos é estimado pelas várias marcas entre 25 e 30 anos”.

Corrêa (2007), afirma:

A empresa americana Spectrolab, uma subsidiária da Boeing, anunciou a criação de uma célula fotovoltaica capaz de transformar em eletricidade 40,7 % dos raios solares que incidem sobre ela. Nas células convencionais usadas hoje nas usinas, esse aproveitamento é de apenas 22%.

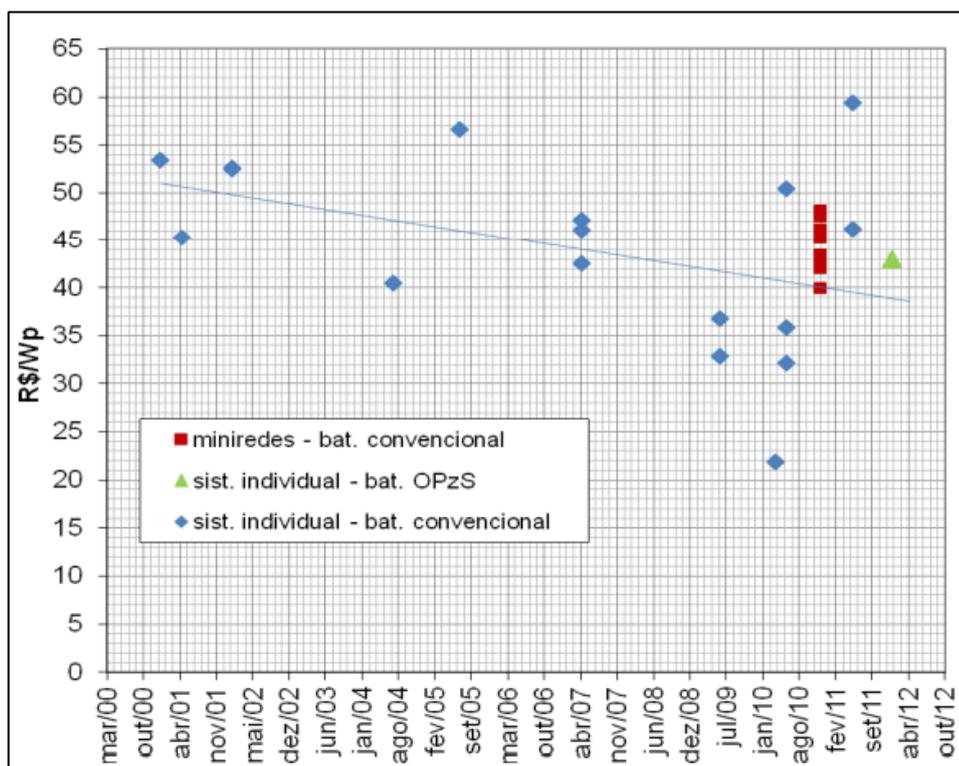
Segundo Galdino (2012), os módulos fotovoltaicos comercializados apresentam atualmente queda nos custos, devido à redução dos custos internacionais. Espera-se uma queda de cerca de 1,70 R\$/Wp ao ano, resultando num valor esperado em abril de 2012 de 9 R\$/Wp. Entretanto, deve-se ressaltar que é possível encontrar valores inferiores no mercado, atingindo até mesmo 4,9 R\$/Wp. A Figura 2 mostra a evolução dos custos dos módulos fotovoltaicos desde 2001, sendo notória a tendência linear de queda ao longo do tempo.



**Figura 2 - Custos históricos de módulos de c-Si, valores corrigidos a valores de mar/2012.**

Fonte: Galdino (2012).

O custo total de implantação de sistemas fotovoltaicos isolados incluindo custos de equipamentos, materiais e serviços de instalação tendem a se tornar mais baratos (GALDINO, 2012). A Figura 3, evidencia essa redução nos custos de implantação, apontando valores atuais de cerca de 38 R\$/Wp.



**Figura 3 - Custo total de implantação de sistemas fotovoltaicos isolados.**

**Fonte: Galdino (2012).**

Dentre as diversas aplicações dos LEDs, a sua aplicação na iluminação vem sendo cada vez mais perceptível (KRÜGER, 2012).

A tecnologia de iluminação LED, como afirma a empresa Halco Lightning Technologies (2010), é um investimento. Por isso é importante saber que, ao comprar uma lâmpada ou luminária LED, existirá uma diferença de preço em sua aquisição, no entanto o retorno virá em seu gasto de energia menor, resultando em contas de energia mais brandas.

Outro fator importante é a durabilidade, as lâmpadas LED possuem uma grande vida útil, chegando a mais de 55.000 horas, o que equivale a 6 anos de uso ininterrupto (KRÜGER, 2012), enquanto que uma lâmpada fluorescente compacta possuem vida útil de aproximadamente 10.000 horas (LUZ, 2012).

A tecnologia de estado sólido, sem filamentos, torna os LEDs muito mais robustos e resistentes a impactos e vibrações. Eles ainda são mais ecologicamente corretos, pois não possuem substâncias tóxicas danosas à natureza (MELLO, 2012).

Segundo o Fórum da Construção (2012), os projetos arquitetônicos de iluminação residencial são atualmente os mais procurados na decoração de

ambientes. Esses projetos além de trazer economia em termos energéticos, são mais ecológicos, e do ponto de vista arquitetônico as lâmpadas LED são mais bonitas e funcionais. No entanto seu custo de aquisição é mais elevado. Devido à alta durabilidade, baixa manutenção e alta eficiência, a iluminação LED pode ser incluída em locais de difícil acesso. Como exemplo, podemos destacar na iluminação residencial externa, o uso como em piscinas e jardins; e na iluminação residencial interna, a iluminação de locais como cantos, corredores, e até salas e quartos.

Segundo o site Ledslife (2012), já existem lâmpadas de LED que substituem perfeitamente as lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas, dimerizáveis (do inglês "*dimable*"), com alta luminosidade, muito maior economia e durabilidade de 50.000 horas. Estima-se 17 anos para se trocar a lâmpada, estimativa feita a partir de uma média de 8 horas diárias de funcionamento. Após esse período a lâmpada não queimará e sim terá perdido de 10 a 15% de sua luminosidade.

Vendo a possibilidade da instalação de painéis fotovoltaicos como fonte de energia para os circuitos de iluminação residencial com lâmpadas LED, acredita-se que a implantação desse sistema trará redução de custos com o faturamento de energia elétrica para o consumidor, bem como servirá de exemplo para o desenvolvimento sustentável.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Através de informações obtidas por meio de livros, artigos, periódicos, catálogos, normas técnicas, sítios da internet e, se necessário, uma pesquisa diretamente em empresas do ramo, serão levantadas características técnicas relacionadas aos aspectos construtivos e funcionais, assim como do custeio de lâmpadas LED e fluorescente, baterias, painéis fotovoltaicos e demais componentes do projeto.

Serão analisadas as condições climáticas pertinentes à região de Curitiba, principalmente com relação à radiação solar. Estas informações deverão ser obtidas por meio de uma pesquisa tendo como referência o Atlas Solarimétrico Brasileiro.

Para a realização dos estudos e construção do protótipo, tem-se como base um projeto civil residencial existente e em fase de construção, onde será possível realizar um projeto luminotécnico com lâmpadas fluorescentes, bem como a previsão de cargas do circuito de iluminação.

Primeiramente, será feito o projeto luminotécnico e, na sequência, a previsão de cargas da residência. Para a construção do protótipo, será dimensionado um sistema fotovoltaico para apenas um dos cômodos.

Conhecidas as necessidades do projeto, podem-se definir as lâmpadas fluorescentes adequadas, possibilitando a execução dos cálculos necessários ao dimensionamento do sistema fotovoltaico, entre eles: potência de inversores, parâmetros dos controladores de carga, capacidade das baterias, potência e quantidade de módulos fotovoltaicos, entre outros parâmetros que serão calculados no decorrer do projeto.

Após realização do projeto luminotécnico para as lâmpadas fluorescentes, será escolhido um modelo de lâmpada de LED que seja mais adequada à iluminação residencial e possua características mais próximas das lâmpadas fluorescentes escolhidas e, ainda, com custo de aquisição acessível ao orçamento do projeto.

A partir dos dados técnicos da lâmpada LED escolhida, serão realizados os mesmos procedimentos realizados para as lâmpadas fluorescentes. Também serão feitos o projeto luminotécnico e a previsão de cargas do circuito de iluminação para a mesma residência em questão, bem como o dimensionamento dos equipamentos do sistema fotovoltaico necessário para suprir este novo sistema de iluminação.

Com a fase de projeto concluída, serão construídos dois protótipos: um para o sistema fotovoltaico de iluminação convencional com lâmpadas fluorescentes; outro para o sistema fotovoltaico de iluminação com lâmpadas LED. Os protótipos serão construídos de tal maneira a representar uma amostragem de como o sistema total se comportaria. Para isso, será escolhido um dos cômodos da residência e, a partir do projeto luminotécnico e posterior escolha da lâmpada adequada para tal cômodo, serão dimensionados os demais parâmetros do protótipo do sistema fotovoltaico.

Os ensaios dos protótipos serão realizados em um mesmo ambiente, para que ambos possuam os mesmos parâmetros de avaliação e coleta de dados.

Por fim, os dados coletados nos ensaios de ambos os sistemas propostos serão comparados, assim como os dados obtidos no desenvolvimento do projeto, visando avaliar o custo benefício energético e financeiro.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será organizado em cinco capítulos:

- O capítulo 1 conterá a introdução ao tema, abordagem à problemática pertinente e a justificativa acerca da relevância do tema. Também serão abordados os objetivos a serem atingidos e os métodos que serão usados para a aquisição dos resultados.
- O capítulo 2 abrangerá a fundamentação teórica pertinente dos sistemas fotovoltaicos, da iluminação a LED e demais componentes pertinentes ao escopo do projeto.
- O capítulo 3 será a respeito do projeto luminotécnico residencial para ambos os tipos de lâmpadas (fluorescente e LED); conterá as informações sobre os ensaios de iluminância para as lâmpadas LED frente às fluorescentes, as curvas iluminância para os dois modelos, o dimensionamento e a montagem dos sistemas fotovoltaicos para os dois tipos de lâmpada, explicando os critérios e demonstrando os cálculos envolvidos e explicitando demais detalhes relevantes.
- O capítulo 4 abordará a análise dos resultados obtidos no projeto luminotécnico residencial e nos ensaios de iluminâncias do protótipo para cada tipo de lâmpada, bem como a análise dos resultados referentes ao sistema fotovoltaico, entre outros que venham a ser relevantes no decorrer do trabalho. Ao fim, será avaliado o custo benefício energético e financeiro de cada um dos sistemas
- O capítulo 5 findará a pesquisa com as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros, visando a continuidade dos estudos realizados. Posteriormente, estarão dispostas as referências, apêndices e anexos, se necessário.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

#### 2.1.1 Efeito Fotovoltaico

De acordo com Chan (2012), o efeito fotovoltaico pode ser descrito como sendo o processo físico que ocorre quando há a incidência de luz solar em uma célula fotovoltaica. A luz solar contém fótons, os quais possuem grande quantidade de energia em diferentes comprimentos de onda do espectro solar e quando estes são absorvidos pelas células e colidem com o material do tipo N, transfere-se a energia dos fótons para um elétron do átomo da célula, sendo que esta se comporta como um semicondutor. Na sequência, o elétron deixa sua posição inicial, deixando uma “lacuna” para que outro elétron ocupe, gerando um campo elétrico na junção P-N e, conseqüentemente, tem-se uma diferença de potencial (DDP), a qual permite que haja corrente elétrica para alimentar uma carga externa. A Figura 4 ilustra o efeito fotovoltaico.

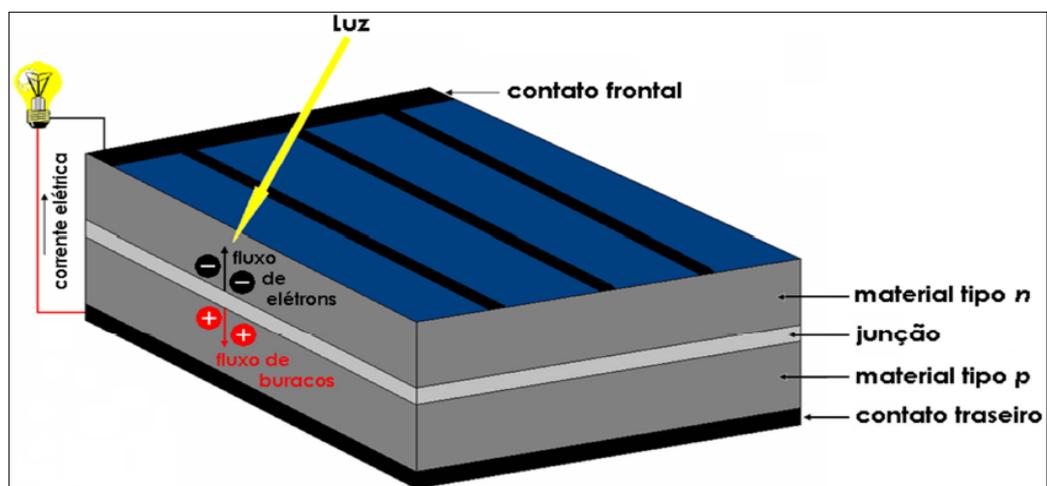
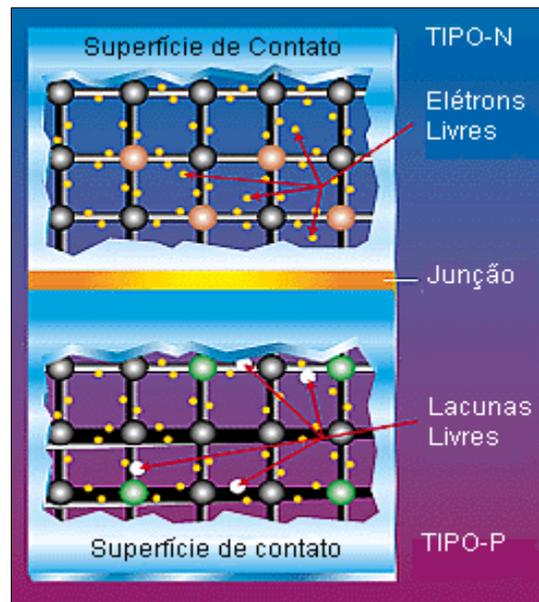


Figura 4 – Efeito Fotovoltaico.  
Fonte: Pinho e Zilles (2011).



**Figura 5 - Semicondutor tipo-N, tipo-P e o Campo Elétrico.**  
**Fonte: Chan (2012).**

Chan (2012) ainda, afirma:

Para induzir o campo elétrico dentro de uma célula fotovoltaica, são intercalados dois semicondutores separados. O "tipo N" e o "tipo P". Embora ambos os materiais sejam eletricamente neutros, o silício tipo-n tem elétrons em excesso e o tipo-p tem lacunas em excesso. Intercalando estes, cria-se uma junção P-N e cria-se um campo elétrico deste modo.

Quando estes dois semicondutores são intercalados, os elétrons em excesso do tipo-n fluem para o semicondutor do tipo-p, e os elétrons que deixaram o tipo-n criam então lacunas no mesmo. [...] Pelo fluxo de elétrons e lacunas, os dois semicondutores agem como uma bateria e criam um campo elétrico na junção P-N. É este campo que fazem os elétrons saltar para a superfície e os faz disponíveis para o circuito elétrico. No mesmo instante, as lacunas se movem para a direção oposta, para a superfície positiva onde elas esperam elétrons livres.

## 2.1.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

### 2.1.2.1 Silício Monocristalino

A produção de células de silício monocristalino se dá a partir do silício purificado, que inicialmente será encontrado como um policristal. Porém, o policristal deve ser transformado num único cristal, que é possível através do *Processo*

*Czochralsky*, que consiste em derreter novamente o silício em um cadinho de quartzo, em temperatura em torno de 1420 °C. Após resfriamento, o novo cristal único de silício (monocristal) é fatiado em lâminas, dando origem às células do tipo silício monocristalino (BLUESOL, 2012a).

Dentre as tecnologias disponíveis no mercado, a tecnologia dos painéis de silício monocristalino é a que atualmente apresenta maior eficiência na conversão direta de energia do sol em energia elétrica (em torno de 15 %). No entanto, o custo de produção ainda se mostra elevado em relação às outras tecnologias (RÜTHER, 2004).



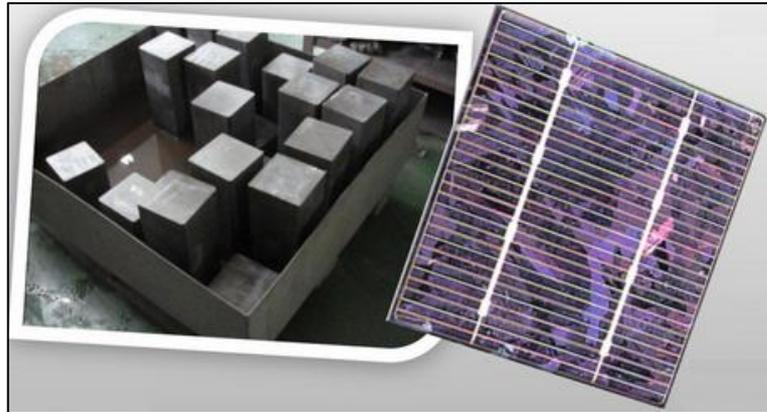
**Figura 6 - Célula de Silício Monocristalino**  
Fonte: BlueSol (2012a).

#### 2.1.2.2 Silício Policristalino

O silício é purificado assim como o silício monocristalino. O silício policristalino é obtido, após o derretido em um cadinho de quartzo e moldado em forma de cubo e, através de um processo controlado de aquecimento e resfriamento, o bloco se solidificará em uma única direção. Como o silício cristaliza livremente, há a formação de vários cristais, por isso o nome: policristalino (BLUESOL, 2012a).

O silício policristalino vem aumentando participação no mercado fotovoltaico mundial, representando atualmente mais de 50 % da produção mundial, devido aos

custos agregados ao processo de fabricação do tipo monocristalino (RÜTHER, 2004).



**Figura 7 - Célula de Silício Policristalino.**  
**Fonte: BlueSol (2012a).**

### 2.1.2.3 Silício Amorfo Hidrogenado

Durante o processo de produção, as células de silício amorfo estão em forma de plasma e podem ser aplicadas com a tecnologia em filmes finos (películas delgadas), o que permite que as mesmas sejam depositadas sobre substratos de baixo custo, como o vidro, aço inox e alguns plásticos. Desta forma, os módulos solares podem ser flexíveis, inquebráveis, leves, semitransparentes, com superfícies curvas, etc. possibilitando e ampliando o mercado fotovoltaico (RÜTHER, 2004).

Diferentemente das células cristalinas, o silício amorfo não possui uma estrutura cristalina, mas uma rede irregular. Conseqüentemente, ocorrem ligações livres que absorvem hidrogênio até a saturação. A principal desvantagem desta tecnologia está na sua baixa eficiência de conversão, que diminui ainda mais durante os primeiros meses de operação (BLUESOL, 2012a).



**Figura 8 - Exemplos de módulos solares fotovoltaicos flexíveis, de silício amorfo hidrogenado em substrato plástico.**

**Fonte: Rüter (2004).**

#### 2.1.2.4 Telureto de Cádmio (CdTe)

Este tipo de célula também é fabricado na forma de filmes finos, sendo possivelmente empregados em edificações com sua recente expansão no mercado fotovoltaico. A grande vantagem se mostra no baixo custo de fabricação, além de possuir maior eficiência em relação às células de silício amorfo. No entanto, as células de telureto de cádmio apresentam as desvantagens da baixa abundância e da maior toxicidade do material (RÜTHER, 2004).

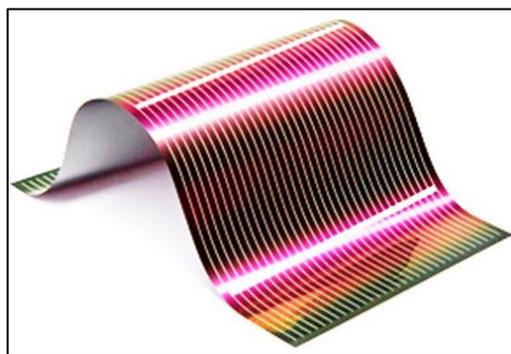
De acordo com BlueSol (2012a), a principal dificuldade para a produção de módulos fotovoltaicos utilizando o Telureto de Cádmio é a toxicidade do cádmio. No entanto, o produto final CdTe é um composto atóxico, sendo tóxico somente durante o processo de fabricação, o que exige procedimentos rigorosos de controle. Por outro lado, as células de telureto de cádmio não se degradam sob a ação da luz.



**Figura 9 - Célula do tipo CdTe.**  
**Fonte: BlueSol (2012a).**

#### 2.1.2.5 Disseleneto de Cobre (gálio) e Índio (CIS e CIGS)

Estas células são a família de compostos baseados no disseleneto de cobre e índio ( $\text{CuInSe}_2$ , ou simplesmente CIS), e disseleneto de cobre, gálio e índio ( $\text{Cu(InGa)Se}_2$ , ou simplesmente CIGS), que atualmente vem ganhando lugar no mercado fotovoltaico, principalmente em aplicações arquitetônicas, devido a sua capacidade de conversão fotovoltaica ter eficiência relativamente elevadas. Assim como as células CdTe, estes tipos de células apresentam as desvantagens da baixa abundância e toxicidade considerável. Entretanto, os módulos de CIGS estão sendo mais comercializados dentre os filmes finos, por apresentar o melhor rendimento fotovoltaico (RÜTHER, 2004).



**Figura 10 - Célula do tipo CIS e CIGS.**  
**Fonte: BlueSol (2012a).**

### 2.1.3 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são formados pelo conjunto de células fotovoltaicas. A Figura 11 mostra hierarquicamente a montagem dos módulos.

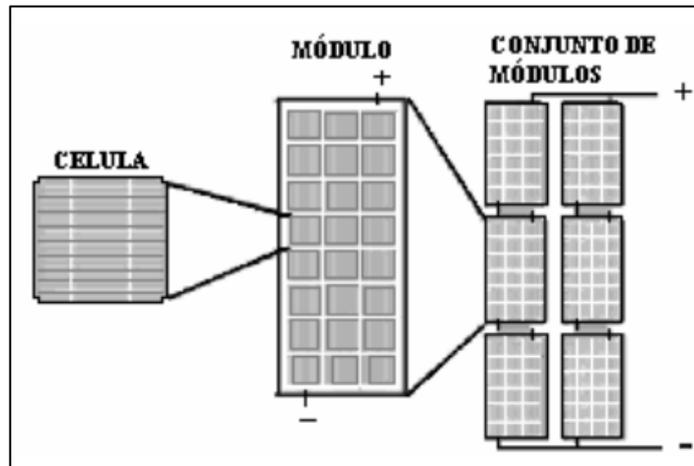


Figura 11 - Hierarquia Fotovoltaica.  
Fonte: Guimarães, Salerno e Leva (2012).

#### 2.1.3.1 Tipos de Arranjos

O arranjo das células nos módulos pode ser feito em série ou paralelo, definindo a corrente e a tensão nos terminais de saída do painel.

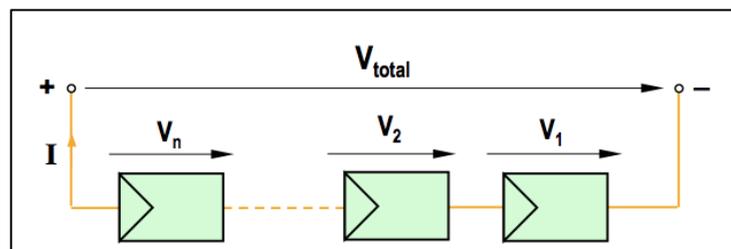


Figura 12 - Conexão das células em série.  
Fonte: Carneiro (2010).

De acordo com Carneiro (2010), na associação em série dos módulos fotovoltaicos, a corrente  $I$  é comum para todos os módulos. Já a tensão total do arranjo será equivalente à soma das tensões geradas por cada módulo, conforme se mostra na Figura 12. Desta forma, obtêm-se as relações das equações 01 e 02:

$$V_1=V_2=\dots V_n=V \quad (01)$$

$$V_{\text{total}}=V_1+V_2+\dots+V_n=n \cdot V \quad (02)$$

A Figura 13, representa um exemplo da curva característica IV para a associação dos módulos em série.

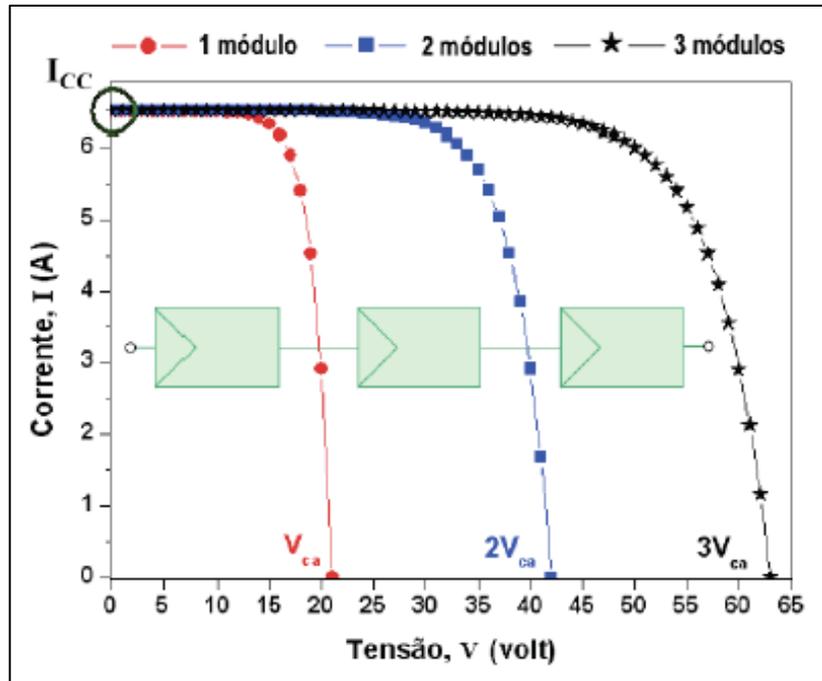


Figura 13 - Representação das curvas IV relativas à associação em série de três módulos fotovoltaicos.  
Fonte: Carneiro (2010).

No caso de associar os módulos fotovoltaicos em paralelo, associação comumente utilizada em sistema autônomos, a tensão no terminal de cada módulo é a mesma do conjunto todo. Já a corrente total do sistema é dada pela soma das correntes geradas por cada módulo.

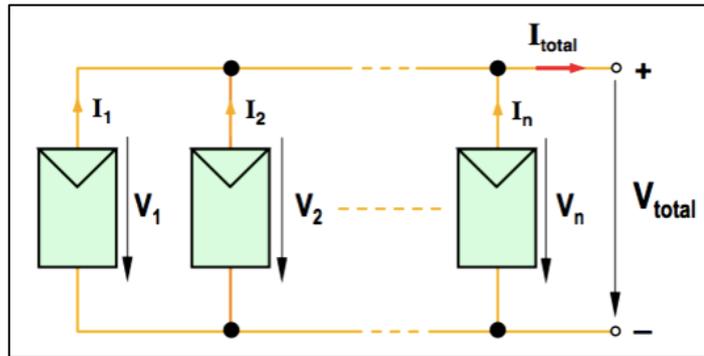


Figura 14 - Conexão das células em paralelo.  
Fonte: Carneiro (2010).

A partir da Figura 14, obtêm-se as relações das equações 03, 04 e 05:

$$V_{\text{total}} = V_1 = V_2 = \dots = V_n = V \quad (03)$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I \quad (04)$$

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 \dots + I_n = n \cdot I \quad (05)$$

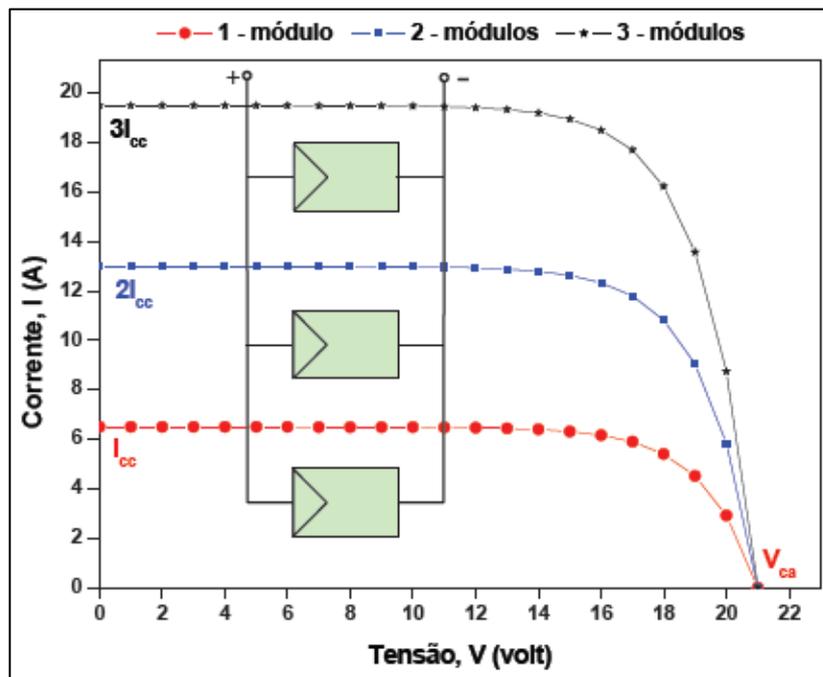


Figura 15 - Representação das curvas IV relativas à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos.  
Fonte: Carneiro (2010).

A Figura 15, representa um exemplo da curva característica IV para a associação dos módulos em paralelo. Notoriamente, a tensão de circuito aberto se

mantém a mesma. No entanto, a corrente de curto circuito é três vezes superior à corrente de curto circuito de cada módulo.

A proteção do arranjo fotovoltaico contra curto-circuito e correntes inversas é feita por meio da utilização de diodos de bloqueio na saída de cada conjunto de módulos. Para evitar que uma das células que esteja associada em série no conjunto prejudique as demais, por motivo de defeito ou qualquer avaria, faz-se o uso de um diodo de passo (de *bypass*), sendo o mesmo colocado em paralelo. O diodo de passo tem por função efetuar o desvio da corrente produzida pelas demais células, para que o arranjo todo não seja comprometido pela célula que apresenta defeito (CARNEIRO, 2010). A Figura 16 representa esquematicamente como são dispostos esses dois diodos em um arranjo misto.

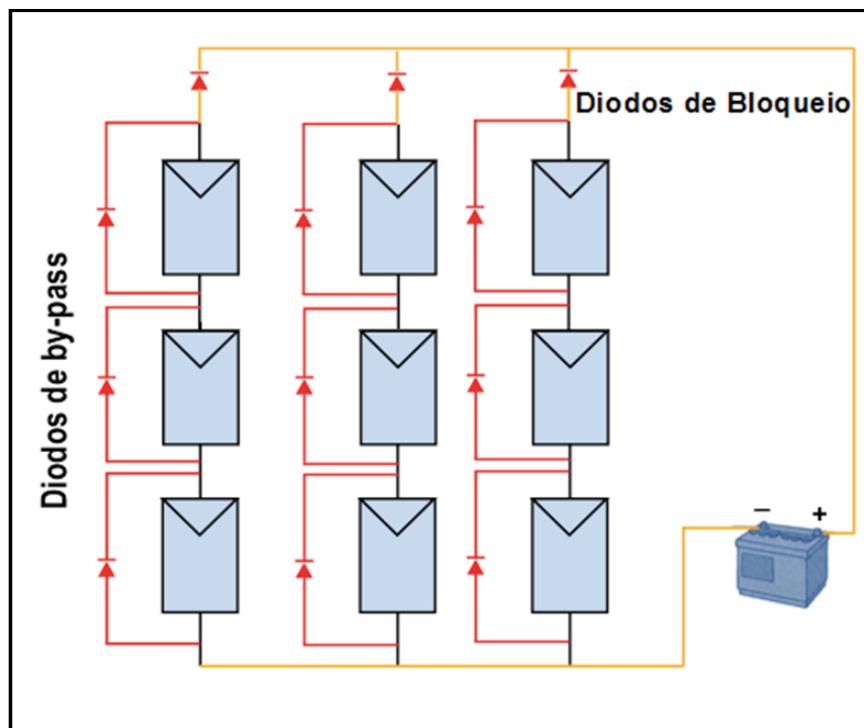


Figura 16 - Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com diodos de *bypass* e de bloqueio.

Fonte: Adaptado de Carneiro (2010).

### 2.1.3.2 Características Elétricas dos Módulos

De acordo com o CRESESB (2004), os módulos geralmente são especificados pela potência de pico ( $W_p$ ), ou seja, a potência associada a testes padronizados (STC - *Standard Test Conditions*) que seguem algumas condições: radiação solar de  $1 \text{ kW/m}^2$ , temperatura de célula  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e Massa de Ar 1,5. No entanto, para avaliar o comportamento do painel em determinados locais, assim como sua aplicabilidade e a carga associada, devem-se levar em conta outros parâmetros, dos quais podem representar diferenças significativas em relação a esses padrões de potência.

Parâmetros que determinam as características elétricas dos módulos:

- **Voltagem de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ):** é a tensão que pode ser medida nos terminais do módulo com um voltímetro, quando o módulo está posicionado na direção do sol e não haja nenhuma carga conectada em seus terminais. Nestas condições não há fluxo de corrente.

- **Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ ):** esta corrente pode ser medida com um amperímetro, com a condição de que não haja alimentação de carga no circuito e que seus terminais positivo e negativo estejam conectados, ocasionando um curto-circuito no módulo, sendo portanto, a tensão igual a zero.

Com a inserção de uma carga conectada aos terminais do módulo, podem-se fazer medições de corrente e tensão, podendo ainda plotar um gráfico, representando comportamento do módulo. Interligando os pontos obtidos, traça-se a curva característica  $I \times V$ , as quais estão associadas com as condições do ambiente (intensidade de radiação, temperatura, etc.)

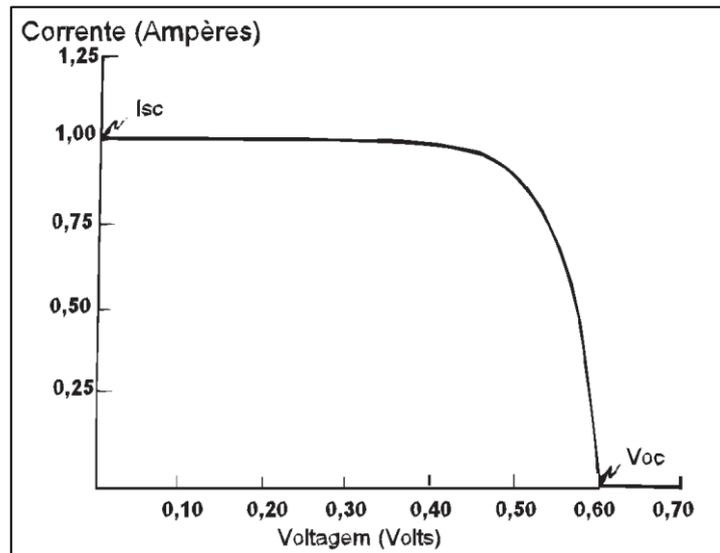


Figura 17 - Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino, normalizada pela corrente de curto-circuito.

Fonte: CRESESB (2004).

- **Potência Máxima (Pm):** cada ponto da curva característica IxV, define a potência para tal condição de operação, já que o produto da corrente pela tensão em cada ponto do gráfico, representa a potência gerada pelo módulo.

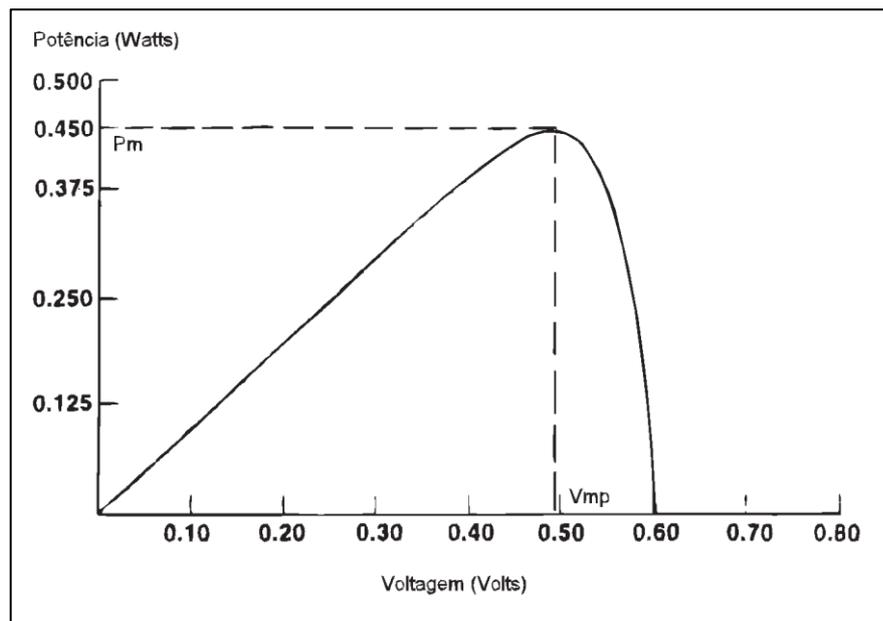


Figura 18 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício monocristalino da Figura 17.

Fonte: CRESESB (2004).

A potência máxima ( $P_m$ ) pode ser obtida pelo produto da tensão de potência máxima ( $V_{mp}$ ) com a corrente de potência máxima ( $I_{mp}$ ).

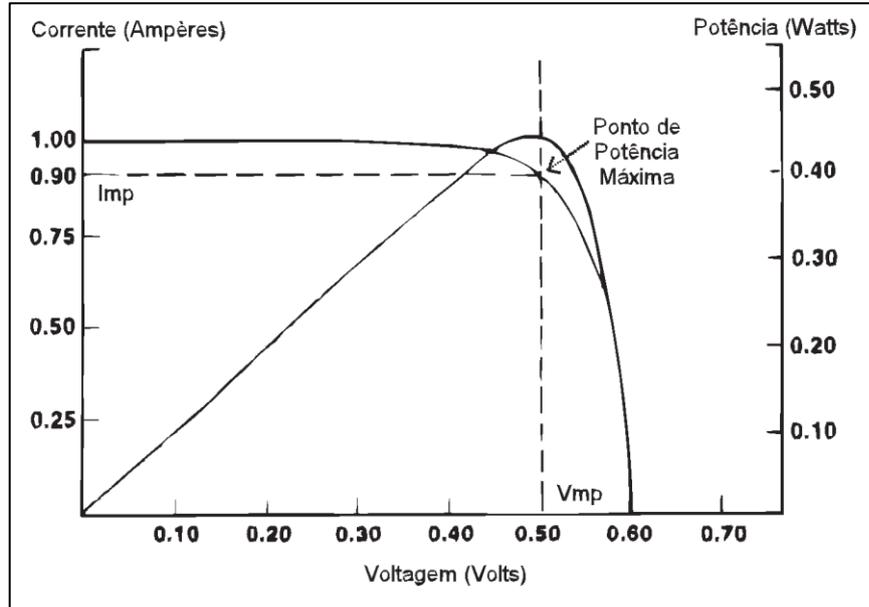


Figura 19 - Parâmetros de potência máxima.  
Fonte: CRESESB (2004).

A partir da curva  $I \times V$ , pode-se também calcular os seguintes parâmetros:

- **Eficiência ( $\eta$ ):** dada pela equação 06:

$$\eta = I_{mp} \times V_{mp} / (A \times I_c) \quad (06)$$

ou ainda, podemos obtê-la pela equação 07:

$$\eta = P_m / (A \times I_c) \quad (07)$$

- **Fator de Forma (FF):** obtido por meio da equação 08:

$$FF = I_{mp} \times V_{mp} / (I_{sc} \times V_{oc}) \quad (08)$$

Onde:

$I_c$  = luz incidente (potência luminosa incidente) [ $W/m^2$ ]

$A$  = área útil do módulo [ $m^2$ ].

### 2.1.3.3 Fatores que Afetam as Características Elétricas dos Módulos

Existem dois fatores que refletem fortemente no desempenho dos módulos fotovoltaicos: a intensidade luminosa e a temperatura (CRESESB, 2004).

Com a variação de intensidade luminosa durante o dia, as curvas de I x V variam instantaneamente. Desta forma, são obtidas diversas curvas que representam essa característica.

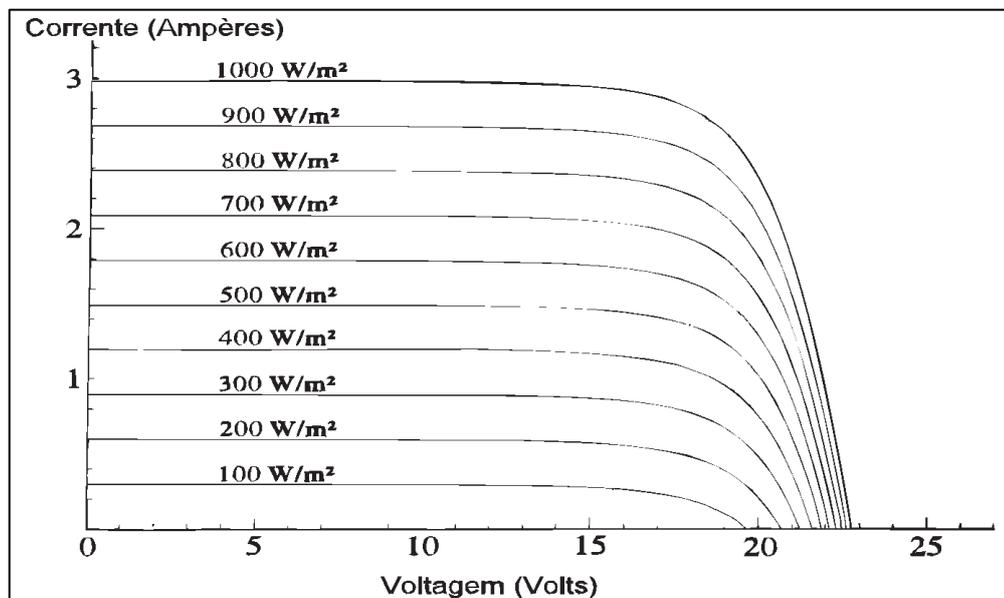


Figura 20 - Efeito causado pela variação da intensidade da luz na curva característica IxV para um módulo fotovoltaico.

Fonte: CRESESB (2004).

Já a temperatura varia conforme a climatologia do local, o que também define a eficiência do módulo.

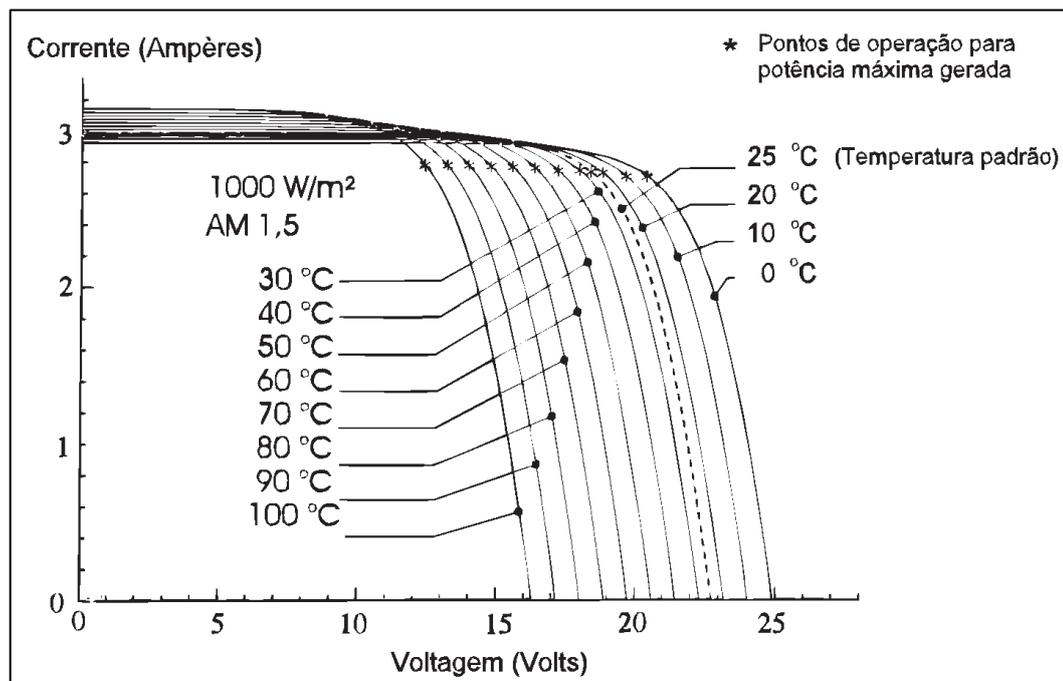


Figura 21 - Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica  $I \times V$  (para  $1000 \text{ W/m}^2$ ) em um módulo fotovoltaico de silício cristalino. Fonte: CRESESB (2004).

#### 2.1.4 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Os tipos de sistemas fotovoltaicos podem ser diversificados da seguinte maneira:

- **Sistemas Autônomos:** de acordo com a BlueSol Energia Solar (2012b), o sistema fotovoltaico autônomo ou isolado é caracterizado por não estar em contato com a rede de distribuição das concessionárias de energia elétrica, podendo ser com, ou sem armazenamento elétrico.

-**Sistemas Autônomos Com Armazenamento:** os sistemas autônomos com armazenamento são os sistemas que utilizam acumuladores, sendo estes dimensionados conforme autonomia que o sistema necessita ter. Para o dimensionamento deste sistema também são levados em conta condições climatológicas do local.

-**Sistemas Autônomos Sem Armazenamento:** estes sistemas operam somente durante os períodos em que há presença do sol. Neste caso, o painel é dimensionado considerando a necessidade do potencial que deve ser fornecido à

carga que será alimentada, além do potencial solar da localidade. Estes tipos de sistemas têm aplicação em bombas de água para locais que não haja disponibilidade da rede elétrica da concessionária de energia, por exemplo.

- **Sistemas Conectados à Rede:** os sistemas conectados à rede, também denominado em inglês por *on-grid* ou *grid-tie*, tratam dos sistemas em que o painel solar alimenta a carga em conjunto com a rede elétrica da distribuidora de energia. Sendo a eletricidade gerada pelo painel em corrente contínua, existe a necessidade de um inversor de frequência, que neste caso converte a corrente contínua em corrente alternada, injetando-a na rede elétrica. A energia excedente à energia demandada instantaneamente pela carga consumidora é injetada na rede elétrica, de tal forma que o medidor de energia “gira ao contrário”, e conseqüentemente, reduz a conta de energia elétrica da propriedade. Quando o circuito consome mais do que fotovoltaico está gerando no momento, a rede elétrica complementa a parte restante demandada pelo circuito (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2012b).

Como sistemas conectados a rede tem-se ainda as usinas solares que são capazes de produzir grande quantidade de eletricidade em um único ponto, possuindo capacidade de geração da ordem de quilowatts a megawatts. Podem ser encontradas em parques industriais ou até mesmo em edificações (AMÉRICA DO SOL, 2012).

- **Sistemas Híbridos:** estes sistemas são mais complexos, por necessitar de um controle capaz de integrar diferentes formas de geração ao mesmo circuito. A geração fotovoltaica pode funcionar em conjunto com geradores eólicos ou diesel, por exemplo, e ainda, serem isolados ou conectados à rede elétrica (AMÉRICA DO SOL, 2012).

#### 2.1.5 Radiação Solar

De acordo com o CRESEB (2004), o planeta Terra descreve uma trajetória elíptica em torno do Sol em relação ao plano equatorial, que por sua vez tem inclinação de aproximadamente 23,5°. Desta forma, a posição angular do Sol pode ser definida como Declinação Solar ( $\delta$ ), pela qual determina as estações do ano em

diferentes localidades do planeta, conforme se mostra na Figura 22. Este ângulo varia ao longo do ano, variando na seguinte faixa:

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$$

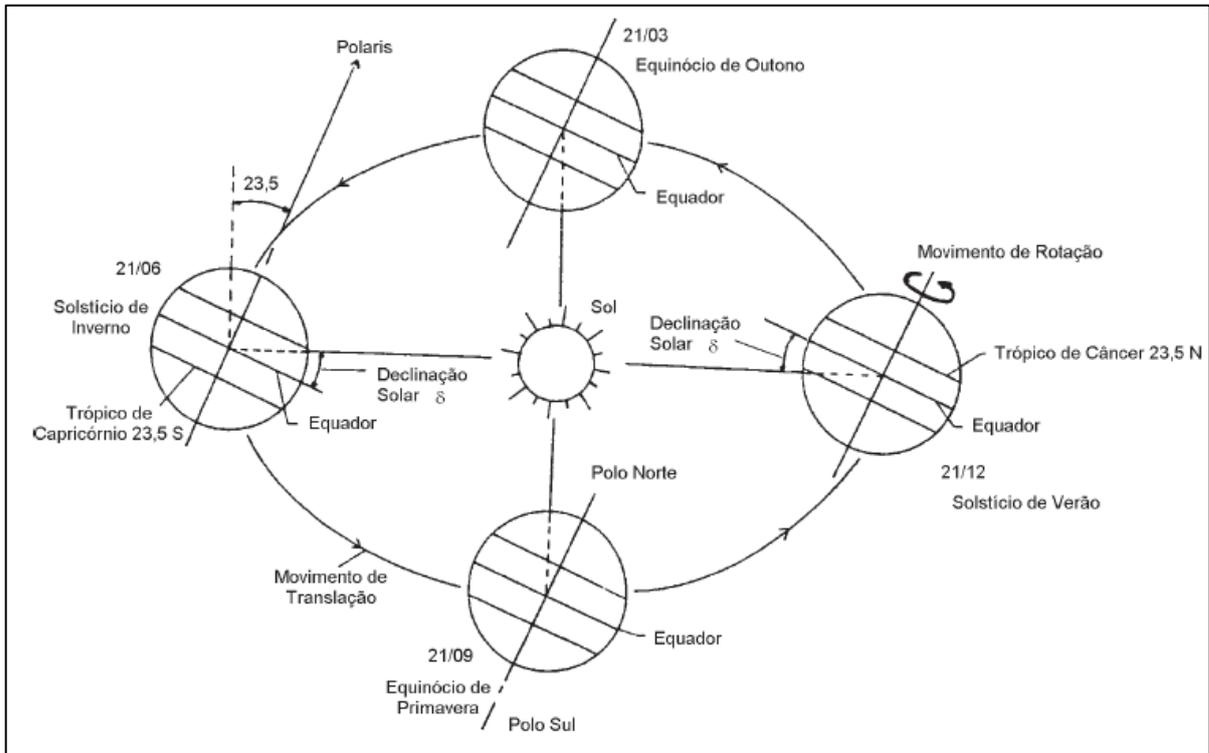


Figura 22 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°. Fonte: CRESESB (2004).

A latitude somada ao ângulo da declinação solar determina a trajetória do movimento aparente do Sol em dada localidade.

O movimento de translação e rotação da Terra está intimamente ligado com a incidência do Sol ao longo do dia. Para isso, definem-se os seguintes ângulos a serem considerados, conforme NBR 10899/2006 – Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia:

- **Ângulo de incidência ( $\theta$ ):** ângulo entre o raio solar incidente (direção do sol) e a normal à superfície da célula ou do módulo.

- **Ângulo azimutal de uma superfície ( $\gamma$ ):** ângulo entre o norte geográfico e a projeção da reta normal à superfície no plano horizontal, com faixa de variação  $-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$  e, por convenção, positivo no sentido leste com norte igual a  $0^\circ$ .

- **Ângulo azimutal do sol ( $\gamma_s$ ):** ângulo entre o norte geográfico e a projeção do raio solar (direção do sol) no plano horizontal, com faixa de variação  $-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$  e, por convenção, positivo no sentido leste com norte igual a  $0^\circ$ .

- **Elevação ou altura solar ( $\alpha$ ):** ângulo de vértice no observador, formado pelas semi-retas definidas pela direção do sol e a projeção da direção do sol no plano horizontal.

- **Inclinação de uma superfície ( $\beta$ ):** ângulo de menor declive entre a superfície e o plano horizontal, com faixa de variação  $0^\circ \leq \beta \leq +90^\circ$ .

- **Ângulo horário solar ( $\omega$ ):** ângulo diedro com aresta no eixo de rotação da Terra, formado pelo semiplano que contém o sol e o semiplano que contém o meridiano local, com faixa de variação  $-180^\circ \leq \omega \leq +180^\circ$  e, por convenção, positivo no período da tarde.

- **Ângulo zenital ( $\theta_z$ ):** ângulo de vértice no observador, formado pelas semi-retas definidas pela direção do sol e a vertical.

Para facilitar a interpretação dos ângulos descritos acima, a Figura 23 indica os ângulos notáveis em energia solar.

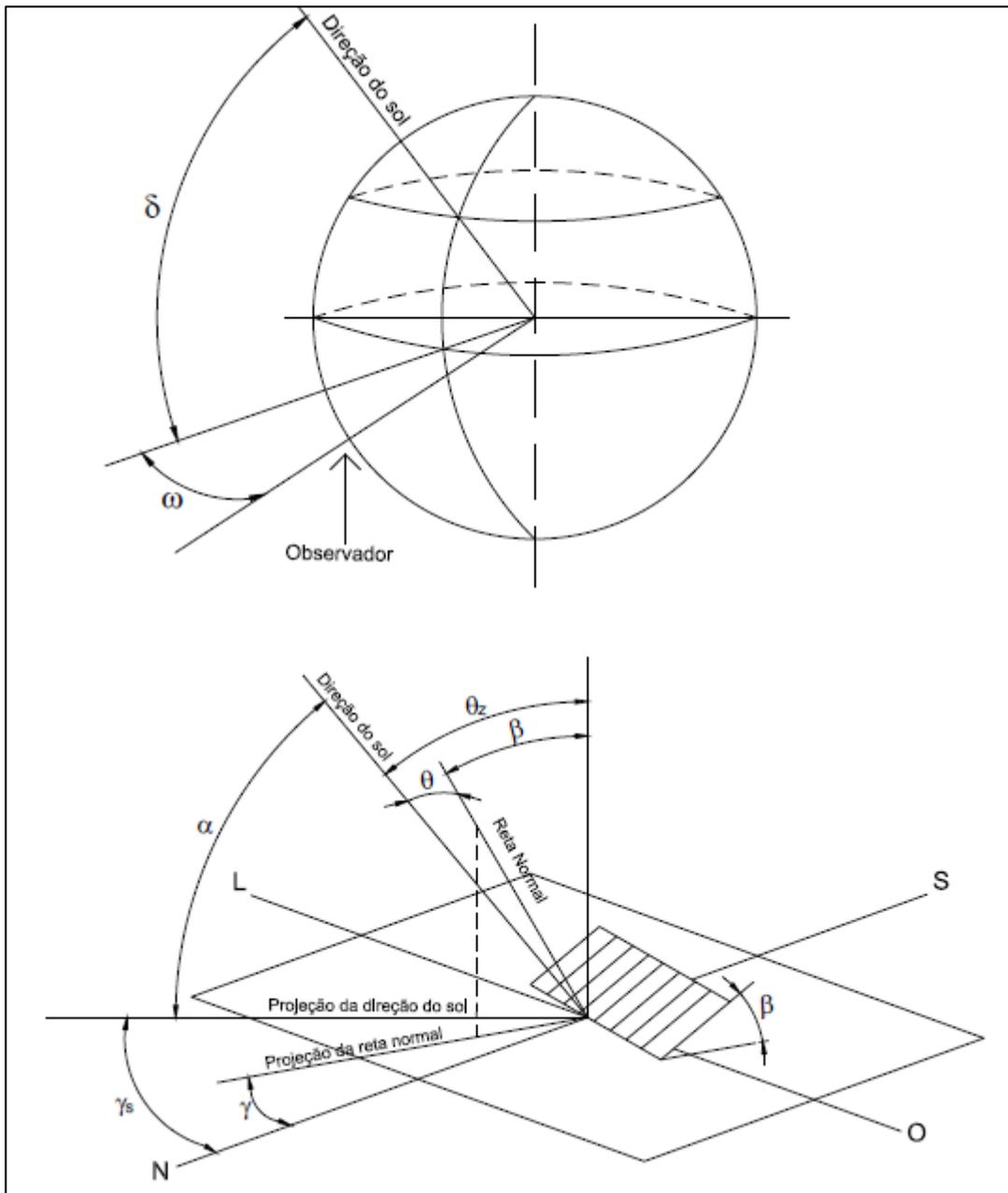


Figura 23 – Indicação dos ângulos notáveis em energia solar.  
Fonte: NBR 10899 (2006).

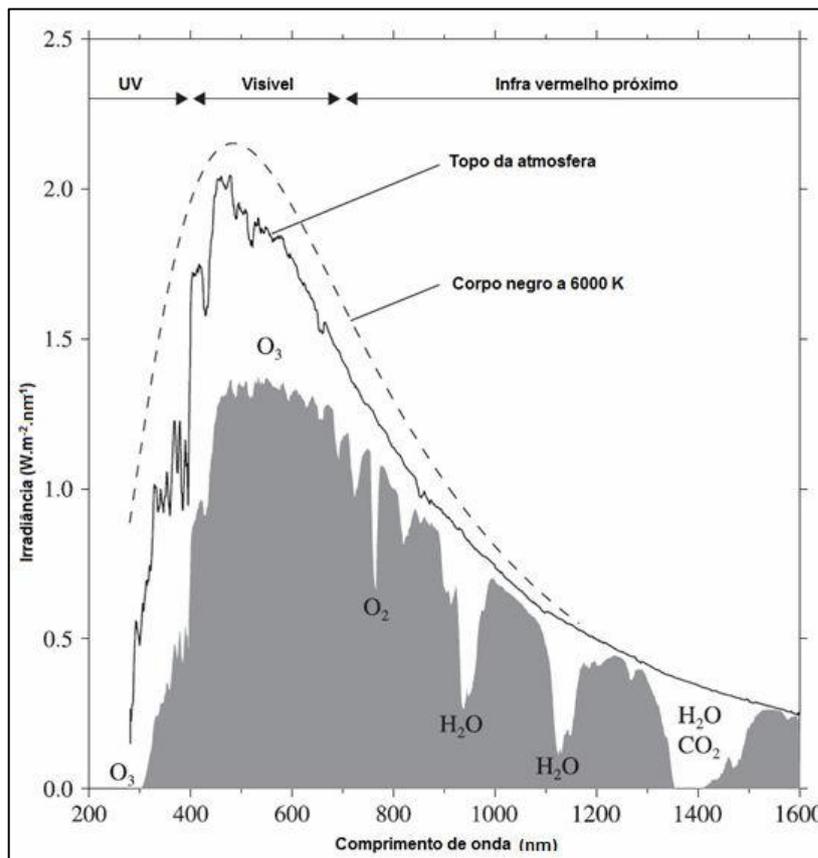
As camadas externas do Sol (cromosfera e coroa) influem significativamente na radiação que chega à atmosfera da terrestre. Para efeito de cálculo, utiliza-se o valor médio de radiação ao longo do ano, denominada constante solar da radiação extraterrestre com valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ . A correção dos cálculos se faz pela órbita elíptica.

Por meio da teoria ondulatória, podem-se definir as propriedades de absorção, reflexão e emissão dos materiais. Em contrapartida, a teoria corpuscular

ou fotônica, baseada na mecânica quântica, determina a potência emissiva espectral do corpo negro em função da temperatura e do índice de refração do meio em que está submerso. Desta mesma maneira, a conversão de energia solar em energia elétrica, pode ser analisada.

O fluxo de fótons com energia unitária  $hf$ , onde  $f$  é a frequência da onda eletromagnética e  $h$  a constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  Js), define a potência de um feixe luminoso. A parcela desta energia que for absorvida por determinado meio material, permite a ocorrência da fotoconversão e termoconversão. No caso de fotoconversão, a absorção ocorre nos materiais denominados por células fotovoltaicas (CRESESB, 2004).

O processo de absorção do espectro solar no topo da atmosfera e ao nível do mar, comparado com o espectro da irradiância de um corpo negro, pode ser vista na Figura 24.



**Figura 24 - O espectro de irradiância da radiação solar no topo da atmosfera (linha sólida) e ao nível do mar (sombreado), em comparação com o espectro de irradiância de um corpo negro (linha tracejada).**

**Fonte: Figueiredo, Alves e Vecchia (2012).**

### 2.1.5.1 Radiação Solar ao Nível do Solo

A radiação antes de chegar à superfície terrestre, é absorvida ou refletida por diversas camadas da atmosfera, podendo ser analisada em componentes: direta, difusa, global e devido ao albedo, conforme se mostra esquematicamente na Figura 25.

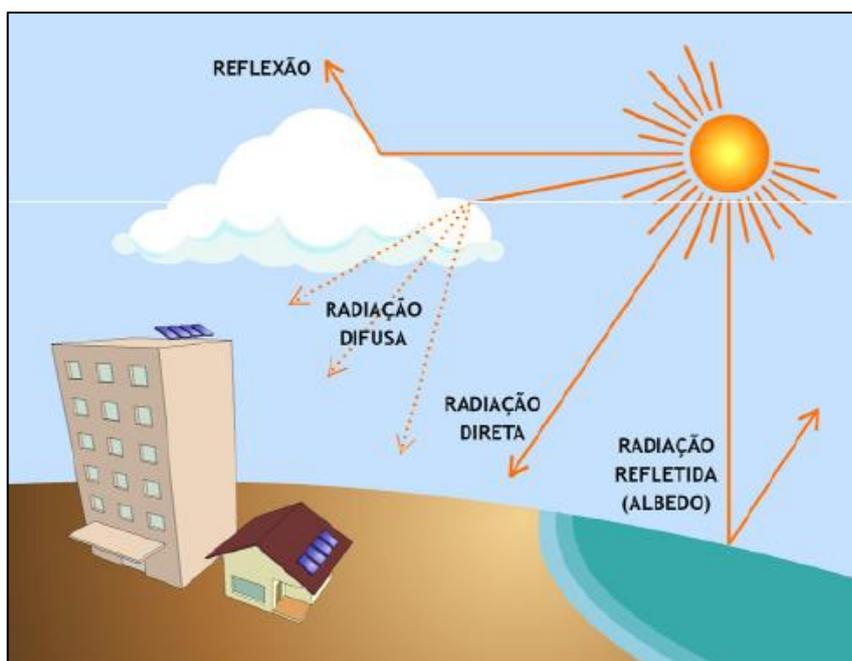


Figura 25 - Componentes da radiação solar ao nível do solo.  
Fonte: Urbanetz Junior (2012).

De acordo com a NBR 10899/2006, a radiação solar pode ser analisada e compreendida a partir das seguintes terminologias:

- **Irradiância solar ( $G$ ):** taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, normalmente medida em watt por metro quadrado.

- **Irradiância direta ( $G_{DIR}$ ):** irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser normal ou horizontal.

- **Irradiância difusa ( $G_{DIF}$ ):** potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta.

**-Irradiância global ( $G_{HOR}$ ):** potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa.

**-Albedo ( $G_{ALB}$ ):** índice relativo à fração da energia radiante solar, recebida em uma unidade de área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo.

**-Irradiância total ( $G_{TOT}$ ):** potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer.

**- Irradiação solar (I ou H):** irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado, simbolizada por “I”, quando integrada no tempo de uma hora, ou por “H”, quando integrada no tempo de um dia.

**-Irradiação difusa ( $I_{DIF}$  ou  $H_{DIF}$ ):** irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, simbolizada por “ $I_{DIF}$ ” ou “ $H_{DIF}$ ”.

**-Irradiação direta ( $I_{DIR}$  ou  $H_{DIR}$ ):** irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, simbolizada por “ $I_{DIR}$ ” ou “ $H_{DIR}$ ”.

**-Irradiação global ( $I_{HOR}$  ou  $H_{HOR}$ ):** irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, simbolizada por “ $I_{HOR}$ ” ou “ $H_{HOR}$ ”.

**-Irradiação total ( $I_{TOT}$  ou  $H_{TOT}$ ):** irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, simbolizada por “ $I_{TOT}$ ” ou “ $H_{TOT}$ ”.

Para avaliar as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) que chegam à superfície terrestre, devem ser considerados os fatores das camadas da atmosfera que absorvem ou espalham a radiação. Para efeito de cálculo, considera-se um coeficiente denominado “Massa de Ar” (AM). De acordo com a NBR 10899, massa de ar pode ser definida como a razão entre o caminho óptico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na

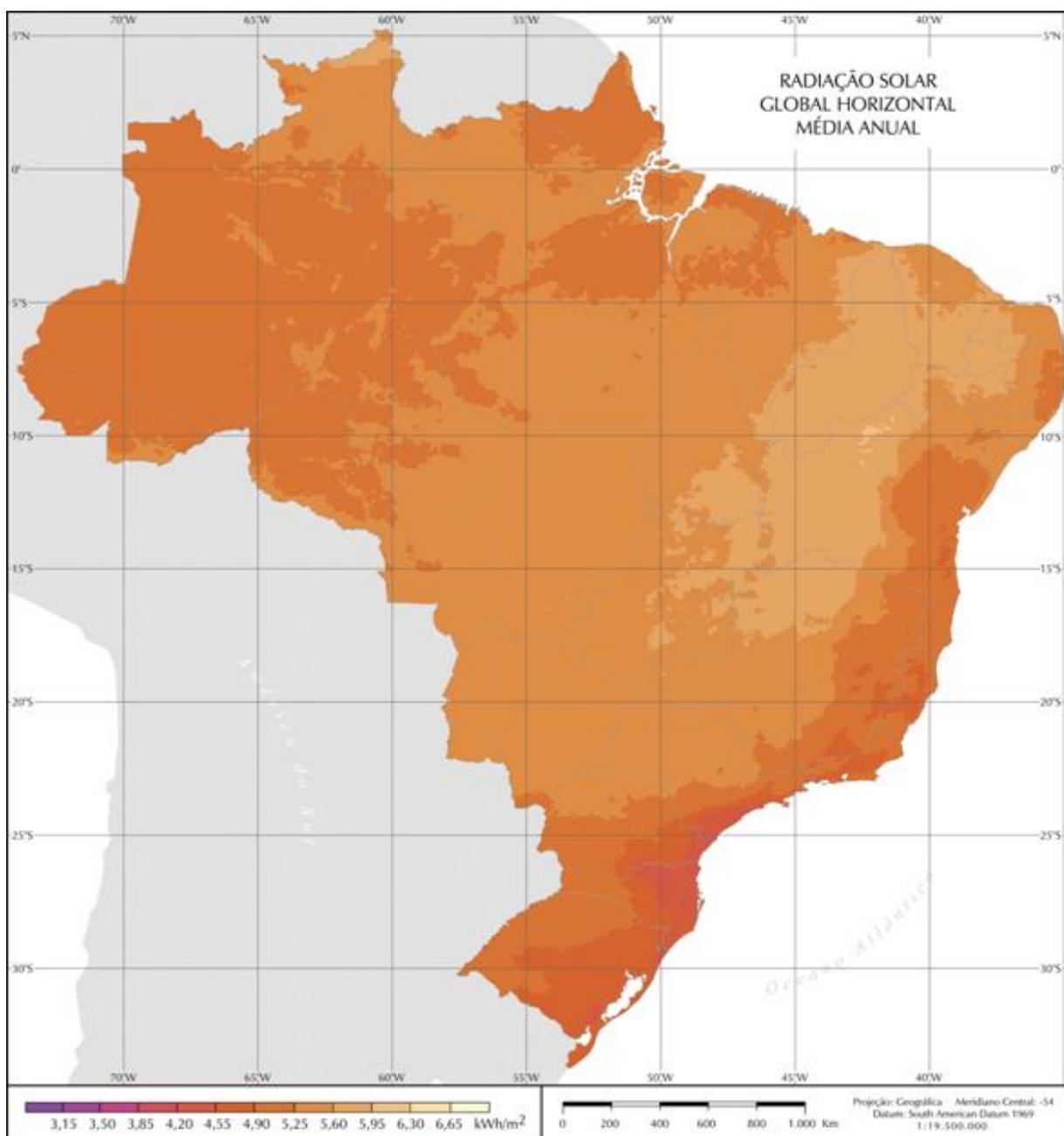
direção de zênite ao nível do mar, simbolizada por “AM” (*Air Mass*), podendo ser aproximada pela equação 09:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)}, \text{ para } \theta_z \leq 70^\circ \quad (09)$$

#### 2.1.6 Mapas Solarimétricos

A radiação solar em determinada região do Brasil pode ser calculada por *softwares*, podendo ainda, se basear no Atlas Brasileiro de Energia Solar. Este Atlas dispõe os mapas solarimétricos e o banco de dados com valores históricos de irradiação, apresentando estimativas de radiação no plano horizontal ou inclinado de todas as regiões brasileiras, obtidos através de imagens de satélite, do qual apresentam os níveis de radiação solar que variam em função da latitude, sazonalidade, clima, dentre outros fatores.

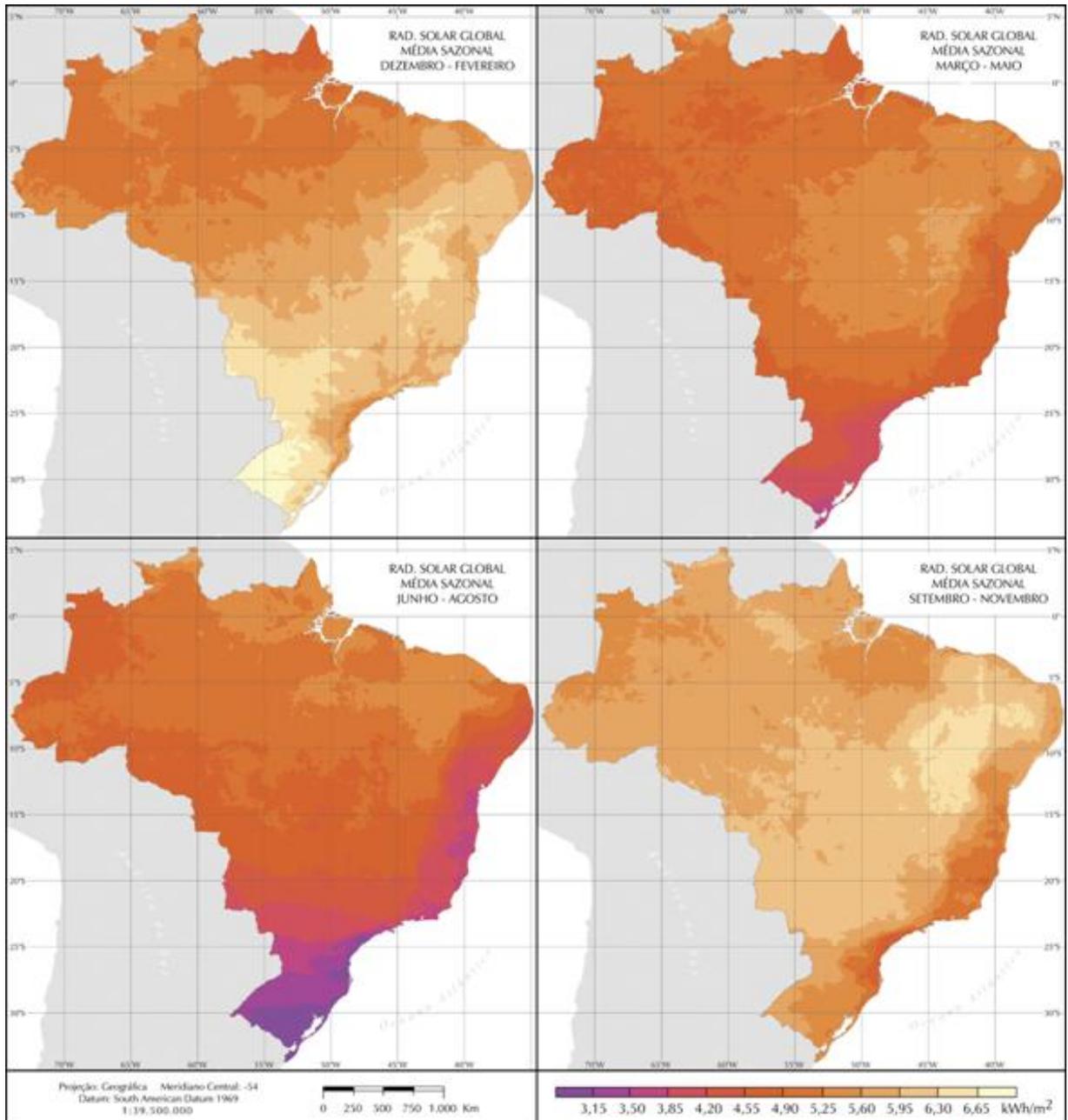
As Figura 26 e Figura 27 mostram, respectivamente, os mapas das médias anual e sazonais da irradiação solar global diária incidente no território brasileiro.



**Figura 26 - Radiação solar global horizontal: média anual.**  
**Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).**

Para efeito de estudo, a média anual da radiação solar global pode apresentar grandes divergências de informações, pois dependendo da localidade, a sazonalidade tem grande influência. Por isso, se faz necessário avaliar a radiação solar a partir de médias sazonais, principalmente quando se trata de regiões mais distantes na linha do equador. Quanto mais distante do equador, maior é a variação de radiação ao longo do ano. A Figura 27 mostra os meses do ano classificados sazonalmente, considerando-se as estações do ano, de modo que o período de

dezembro a fevereiro refere-se ao Verão, de março a maio ao Outono, de junho a agosto ao Inverno e de setembro a novembro refere-se à Primavera.



**Figura 27 - Radiação solar global diária: médias sazonais.**  
 Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).

Conforme Figura 27, observa-se que os menores valores de irradiação global estão ocorrendo nos períodos de inverno, principalmente na região Sul do Brasil, notadamente na costa norte do estado de Santa Catarina, litoral do Paraná e litoral sul de São Paulo. As características de clima temperado dessa região e a influência

de sistemas frontais associados ao Anticiclone Polar Antártico contribuem para o aumento da nebulosidade na região, principalmente durante os meses de Inverno. (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2006).

De acordo com o Urbanetz Junior (2012), pode-se fazer o uso do programa RADIASOL para estimar os níveis de radiação de um determinado local. Através deste programa, podem-se calcular as irradiações incidentes no plano inclinado. A partir do banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, encontram-se os valores históricos de irradiação global no plano horizontal de diferentes regiões. Com esses dados, o RADIASOL calcula os níveis de irradiação, convertendo os valores do plano horizontal para um plano inclinado, conforme inclinação desejada. No caso de sistema fotovoltaico isolado, deve-se ajustar a inclinação do plano conforme região. Numa região que se encontra situada no hemisfério sul, por exemplo, deve-se ajustar o arranjo fotovoltaico com orientação voltada ao norte geográfico e inclinação equivalente à latitude do local acrescentando uma inclinação na faixa de 10 a 15 graus.

## 2.2 BATERIAS

### 2.2.1 Breve Histórico

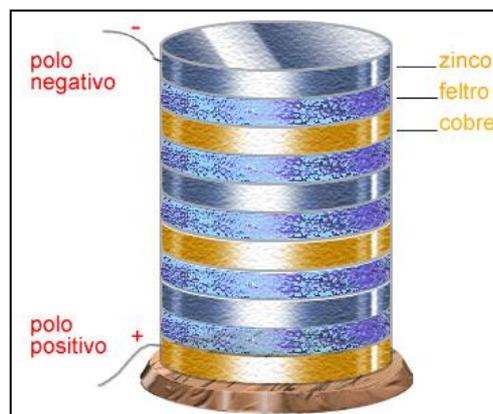
Segundo Gill (2012), as baterias surgiram na humanidade há muitos séculos atrás, como inferido pelo arqueólogo alemão Wilhelm König, nos anos 30 do século passado descobriu um vaso de barro que se especula que tenha tido um funcionamento semelhante a uma bateria (Figura 28), datado por volta de 250 A.C.



**Figura 28 - Bateria de Bagdá**  
**Fonte: Virtue science, (2012).**

Segundo Mehl (2012), no século 18 começou-se uma série de experimentos com eletricidade, onde podemos destacar o trabalho do fisiologista Luigi Galvani em 1789, que ao colocar as pernas de uma rã entre dois eletrodos, um de cobre e um de zinco, descobriu que ocorria uma contração muscular, fato que acreditava ser resultante de um tipo de eletricidade animal.

Apenas dez anos mais tarde, Alessandro Volta na Itália descobriu que a eletricidade no sistema do fisiologista não era causada pelo próprio animal, mas pelo fato de usar dois metais diferentes em uma solução salina. Volta fez diversas experiências e chegou ao primeiro protótipo de pilha, com diversos discos de zinco, de prata e de feltro embebido em uma solução de água e sal, mostrado no Figura 29 (MEHL, 2012).



**Figura 29 - Pilha de Volta**  
**Fonte: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (2007)**

Segundo a empresa Fronius (2012), os avanços posteriores contam com alguns experimentos relevantes como o ocorrido em 1859, onde o inventor francês

Gaston Planté desenvolveu a primeira bateria chumbo-ácido recarregável. Por volta de 1880 começou a industrialização dessas baterias, com o desenvolvimento de um método no qual a bateria chumbo-ácido com apenas poucos ciclos de carga, era capaz de atingir uma alta capacidade. Emilie Alphonse Lauré cobriu ambos os lados de uma folha de chumbo com uma pasta de pó também de chumbo e ácido sulfúrico e com esse processo, conseguiu-se uma alta capacidade após a primeira carga.

## 2.2.2 Classificações das Baterias

Segundo o CRESESB (2004), no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, as baterias podem ser classificadas de diversas formas, entre essas, as classificações seguintes:

### 2.2.2.1 Classificações Quanto a Reusabilidade

- Baterias Primárias

Não recarregáveis. Geralmente utilizadas em aplicações que consomem pouca corrente, como relógios, controles remotos entre outros usos.

Segundo Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000, p. 4), pode-se citar os seguintes exemplos: zinco/dióxido de manganês (Leclanché), zinco/dióxido de manganês (alcalina), zinco/óxido de prata, lítio/dióxido de enxofre, lítio/dióxido de manganês, etc.

- Baterias Secundárias

Baterias recarregáveis (centenas e até milhares de vezes para o caso de baterias especialmente projetadas). Como regra geral, um sistema eletroquímico é considerado secundário quando é capaz de suportar 300 ciclos completos de carga e descarga com 80 % da sua capacidade. Exemplos: cádmio/óxido de níquel (níquel/cádmio), chumbo/óxido de chumbo (chumbo/ácido), hidreto metálico/óxido de níquel, íons lítio etc. utilizadas em situações com maiores correntes, como em automóveis ou sistemas elétricos autônomos (CRESESB, 2004).

### 2.2.2.2 Classificações Funcionais

Em termos funcionais, existem diversas características relevantes. Quanto a tipo de uso, podemos classificar as baterias secundárias como:

- Automotivas

São baterias projetadas para descargas com correntes elevadas com baixa profundidade de descarga.

- Estacionárias (ou de ciclo profundo)

As baterias ditas estacionárias permanecem em flutuação e normalmente são chamadas ocasionalmente para ciclos de carga e descarga.

- Fotovoltaicas

São projetadas para ciclos diários rasos, mas devem suportar descargas mais profundas, de forma ocasional, devido a ausência de condições propícias para a geração.

### 2.2.2.3 Classificações Construtivas

Em termos construtivos, uma classificação possível é classificar as baterias secundárias como:

- Baterias Abertas

Necessitam de verificação do nível do eletrólito. Devem permanecer na posição vertical.

- Baterias Seladas

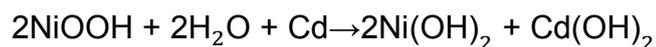
O eletrólito é confinado no separador, ou está na forma de gel. Não é necessária a adição de água.

### 2.2.3 Principais Baterias Secundárias Utilizadas

Entre as baterias secundárias mais comercializadas, destacam-se as de chumbo/ácido e níquel/cádmio. O funcionamento básico dessas baterias tem-se da seguinte forma:

#### 2.2.3.1 Bateria cádmio/óxido de níquel (níquel/cádmio)

A bateria de níquel-cádmio tem seu anodo formado por uma liga de cádmio com ferro e seu cátodo composto de hidróxido de níquel mergulhados em uma solução de hidróxido de potássio com concentração entre 20 e 28 % de massa. A sua reação global, na descarga, é descrita da seguinte forma (SECRETARIA DE EDUCAÇÃO BÁSICA, 2006):



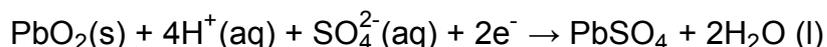
De acordo com o sitio MSPC (2007), as células níquel-cádmio possuem algumas vantagens com relação às células chumbo-ácido, como vida útil maior, e maior tempo de conservação sem uso, porém o custo é superior.

#### 2.2.3.2 Bateria Chumbo-Ácido

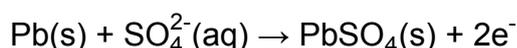
De acordo com CRESESB (2004), as baterias chumbo-ácido usam  $\text{PbO}_2$  como eletrodo positivo e chumbo metálico  $\text{Pb}$  como eletrodo negativo. Essas placas são mergulhadas em uma solução de ácido sulfúrico em água, em geral na proporção 36 % de ácido sulfúrico e 64 % de água.

Na descarga o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reage com os materiais ativos das placas e produz água, diluindo o eletrólito. No carregamento o processo ocorre no sentido contrário.

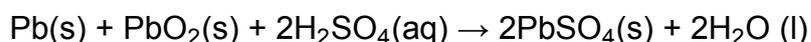
No cátodo, o dióxido de chumbo reage com ácido sulfúrico durante o processo de descarga, produzindo sulfato de chumbo e água:



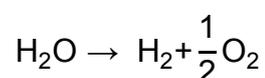
No anodo, chumbo reage com íons sulfato formando sulfato de chumbo:



A reação global apresenta somente sulfato de chumbo e água como produtos:

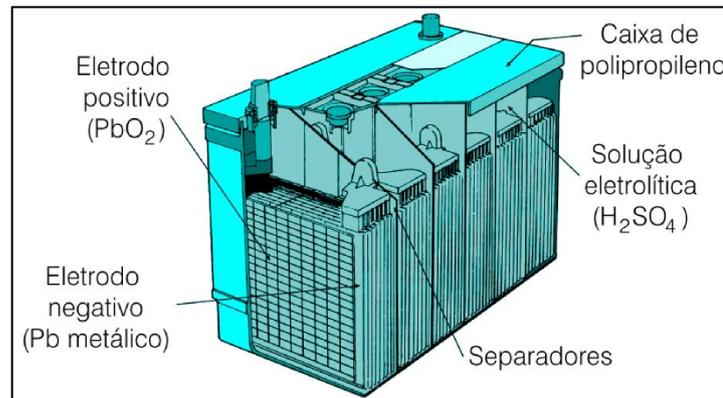


Quando a bateria está completamente carregada, começa a ocorrer a produção de hidrogênio e oxigênio. Isto ocorre, pois todo o material das placas foi utilizado não sendo mais possível converter a corrente e a energia elétrica em energia química. Nesse instante a tensão da célula está maior que a tensão de gaseificação, que para a eletrólise é cerca de 2,39 V por célula, acarretando numa perda de água, segundo a seguinte reação:



Nas células seladas, esta reação é controlada.

Nas baterias automotivas, essa construção basicamente fica disposta da seguinte forma (Figura 30):



**Figura 30 – Bateria Chumbo Ácido.**  
**Fonte: BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO (2000).**

### 2.2.3.3 Terminologia de Baterias

- Auto-descarga

As baterias descarregam-se automaticamente, mesmo quando não estão em uso, por conta de processos químicos internos. A isto, chama-se auto-descarga.

Normalmente a taxa de auto-descarga de uma bateria é especificada como um percentual da capacidade nominal que se perde por mês.

Baterias de chumbo-ácido têm taxa de auto-descarga maior que baterias de níquel-cádmio, sendo que as primeiras podem perder 5 a 30% e as segundas perdem em média 3 a 6 % ao mês.

- Capacidade

Normalmente é definida em ampères-hora que se pode retirar da mesma a carga-plena, podendo-se também ser expressa em energia. (Watt-hora ou kiloWatt-hora).

- Capacidade Nominal

Uma estimativa do fornecedor para a capacidade de uma bateria nova, segundo os valores especificados de corrente de descarga, tensão de corte e temperatura.

- Capacidade de Energia

É o total de Watts-Hora que pode ser tirado da bateria, quando esta se encontra completamente carregada. A velocidade de descarga é inversamente proporcional à disponibilidade de carga, ou seja, quanto mais rápida for a descarga, menor a quantidade de carga disponível para o sistema.

- Carga

Processo de conversão de energia elétrica em energia química na bateria.

- Ciclo

Chama-se de ciclo a sequência de carga e descarga da bateria, até uma determinada profundidade de descarga.

- Densidade de energia

Energia, em termos de capacidade de energia, por volume ou peso da bateria.

- Descarga

Processo de conversão de energia química em energia elétrica. Quando essa descarga passa da metade da sua capacidade, a descarga é chamada de Descarga Profunda.

- Eficiência

Existem três formas comuns de expressar a eficiência de uma bateria:

- 1) Eficiência Coulômbica ou de Ampère-hora (Ah)

É a relação entre a quantidade em Ah que foi retirada de uma célula ou bateria durante a descarga e a quantidade que é necessária para que se retome o estado de carga no início do processo. Calculada pela razão entre a integral da corrente no tempo de descarga e carga.

## 2) Eficiência de Tensão

Relação entre as tensões médias de carga e descarga durante o ciclo em questão.

## 3) Eficiência de Energia ou de Watt-hora (Wh)

Relação entre a energia retirada durante a descarga e a energia que é necessária para restaurar a carga no início do processo.

- Eletrodo

Eletrodos transportam a corrente para o topo dos terminais e dão suporte para o material ativo.

- Eletrólito

Ambiente em que ocorre o mecanismo de transporte dos íons entre os eletrodos de diferentes polaridades. Nas baterias do tipo chumbo-ácido, o eletrólito participa diretamente das reações eletroquímicas que ocorrem na carga e na descarga.

- Equalização

Nome dado ao processo em que se procura igualar o estado de carga das células que fazem parte da bateria. Para as baterias do tipo chumbo-ácido, este processo é feito para que se leve todas as células da bateria à plena carga.

- Estado de carga

Disponibilidade de capacidade de uma bateria expressa em termos percentuais da capacidade nominal. Valor que somado à profundidade da descarga, compõe a capacidade total da bateria.

- Flutuação

Processo de carga importante para as baterias chumbo-ácido, para manter as baterias em um estado de carga próximo à carga plena para evitar que estas fiquem longos períodos com estado parcial de carga.

- Gaseificação

Formação de gases por ação da eletrólise da água durante o processo de carga e tem relação com a sobrecarga.

- Grade

Estrutura que dá suporte ao material ativo, mas não participa da reação de carregamento e descarga.

- Material ativo

O Material que realiza a reação de carga e descarga da bateria, propriamente dito.

- Placa

Placas compõem a montagem do material ativo propriamente dito. As placas compõem os eletrodos da célula.

- Profundidade de descarga

O termo profundidade de descarga relaciona em termos percentuais o quanto da capacidade nominal da bateria já foi retirado. As baterias de chumbo-ácido possuem restrições consideráveis com relação a profundidades grandes de descargas, sendo que essas podem alterar seu desempenho.

- Separador

Material isolante e permeável à passagem de íons, utilizado para não permitir o contato direto entre as placas que compõe a célula.

- Sobrecarga

Quando a bateria chega a sua carga-plena e mesmo assim ocorre a continuidade do processo de fornecimento de corrente elétrica, ocorre o que é chamado de sobrecarga. Esse processo pode acarretar em gaseificação, sobreaquecimento e necessariamente perda de água, afetando a vida-útil do equipamento.

- Sulfatação

Aparecimento de sulfato de chumbo cristalizado nas placas de uma bateria chumbo-ácido. Pode ocorrer por deixarem-se baterias desse tipo descarregadas por longos períodos de tempo. Pode causar aumento da resistência interna.

- Taxa de carga

Valor da corrente que é cedida a uma bateria durante o seu processo de carregamento. Pode-se medir em ampères, mas normalmente é dada em relação à capacidade da bateria.

- Taxa de descarga

O contrário de taxa de carga. A corrente da bateria durante o seu processo de descarga.

- Tensão de circuito aberto

Tensão que se encontra nos terminais da célula para um estado de carga e uma temperatura específica, quando não há corrente fluindo entre os terminais.

- Tensão de corte

Valor de tensão na qual a descarga da bateria sofre interrupção. Pode ser expressa em termos operacionais ou dada como a tensão final de descarga a partir de onde podem ocorrer danos irreversíveis na bateria.

- Tensão de final de carga

É a tensão da bateria onde o processo de carga sofre interrupção por acreditar-se que a carga no momento é suficiente ou que o dispositivo está plenamente carregado.

- Tensão nominal

A tensão média de uma bateria durante a descarga, a uma dada taxa de descarga e temperatura.

- Terminais

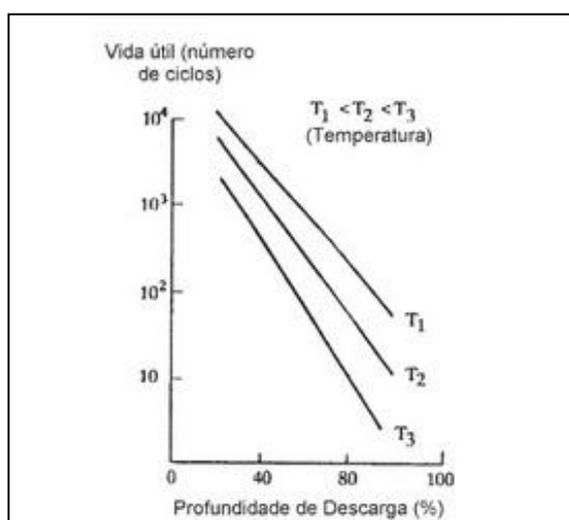
Locais das baterias onde se faz a sua conexão elétrica externamente.

- Vida útil

A vida útil de uma bateria pode ser vista sob dois parâmetros principais:

1) Número de ciclos

Neste parâmetro, a vida útil é vista como a quantidade de ciclos, a uma determinada profundidade de descarga, que uma bateria pode conceber antes de começar a falhar em atender as especificações. Este número depende da profundidade da descarga do ciclo, da taxa de corrente de descarga e da temperatura em que ocorre essa descarga (Figura 31). Para as baterias chumbo-ácido, a vida-útil é considerada encerrada geralmente quando a bateria pode fornecer apenas 80 % da sua capacidade nominal. Esta perda é dada por conta do desprendimento de material ativo que ocorre a cada ciclo.



**Figura 31 - Curvas Típicas do Efeito da Profundidade da Descarga e Temperatura sobre a vida útil da bateria.**

Fonte: CRESESB (2004).

2) Período de Tempo

O parâmetro temporal está diretamente relacionado à temperatura, armazenamento, cuidados e outros fatores, que podem alterar significativamente o desempenho da bateria. (CRESESB, 2004)

#### 2.2.4 Banco de Baterias

Segundo Silva (2010), um banco de baterias é utilizado para a manutenção do fornecimento de energia elétrica para sistemas que necessitem de maior autonomia.

Existem duas formas de se aumentar o tempo de autonomia de um sistema, podendo-se utilizar baterias de maior capacidade ou então conectando varias baterias em paralelo, de maneira que todas funcionem como uma bateria de alta capacidade, conforme Figura 32.



**Figura 32 - Banco de Baterias 12x 220 Ah na Pousada Solar dos Ventos (Fernando de Noronha).  
Fonte: Guia do Hardware (2010).**

Se a tensão nos terminais permanece constante, então a capacidade de corrente aumentará, provocando um ganho na capacidade e autonomia do sistema. Por exemplo, se ligarmos duas baterias de 12 V e capacidade de 20 Ah em paralelo, têm-se um banco de baterias equivalente a uma bateria com os mesmos 12 V, porém com capacidade de 40 Ah.

#### 2.2.4.1 Dimensionamento do Acumulador de Energia

Segundo a NBR 14298, que visa à normatização dos acumuladores para sistemas fotovoltaicos, diversos passos devem ser considerados na etapa de dimensionamento, visando o fornecimento de energia quando o arranjo de carga for superior ao fornecido pelos painéis e também o acúmulo de energia quando o fornecido pelo sistema for superior ao demandado pela carga.

Entre esses passos, podem-se citar os seguintes:

##### a) Determinação da Autonomia do Sistema

Considerada a partir de alguns critérios específicos, como o número de dias “sem sol” ou parcialmente nublados, a previsibilidade do consumo do sistema, a existência de fontes que possam substituir o fornecimento pelos painéis fotovoltaicos, a facilidade de acesso ao local de instalação dos painéis e os custos envolvidos no sistema.

A autonomia usual dos sistemas normalmente é igual ao número de dias “sem sol” arbitrados para o sistema e, em sistemas autônomos, normalmente estipulam-se em dois dias.

##### b) Determinação do Perfil de Consumo da Carga

O perfil de consumo da carga pode ser dado como a descrição dos valores e tempo de duração das correntes da carga em corrente contínua, e no caso de cargas alimentadas em CA, do valor convertido dessas correntes, considerando-se as perdas no inversor.

Os valores de médio e máximo do consumo de corrente dessa carga total devem ser usados respectivamente para o dimensionamento inicial do banco de baterias e para a verificação se essas baterias são capazes de fornecer ao sistema a corrente por ele demandada, dentro da sua tensão nominal.

##### c) Verificação da Faixa de Tensões de Operação

São os valores máximos e mínimos dos pontos de consumo.

d) Cálculo da Corrente Momentânea

É estipulada como a somatória do máximo dos valores de corrente de baixa duração de todas as cargas, como, por exemplo, correntes de partida.

e) Cálculo da Corrente de Operação

É a corrente após a queda da partida. É estipulada como a corrente a 95 % da tensão do sistema.

f) Determinação do Tempo de Consumo

É o tempo de consumo de cada ponto da carga em horas por dia.

g) Verificação da Simultaneidade

As correntes coincidentes devem ser somadas.

h) Mensuração dos Ampères-hora Diários

O consumo médio de energia em ampères-hora é calculado como a somatória de todas as correntes de operação do sistema multiplicadas pelo seu período de duração. No caso de correntes momentâneas, deve-se adotar como um minuto o seu período de duração, por vez que entra no sistema.

i) Capacidade Preliminar sem Ajustes do Banco de Baterias

Esse valor é dado pela quantidade em Ah utilizada pela carga em um dia multiplicado pela quantidade de dias de autonomia. Esse valor deve sofrer ajuste, devido às condições de operação e das características das baterias.

j) Seleção do Tipo da Bateria

Preliminarmente à continuação do cálculo do dimensionamento da bateria, deve-se escolher um tipo de bateria inicial, devido às características de profundidade de descarga e da vida-útil da bateria.

k) Ajustes do Valor de Capacidade

Os ajustes se subdividem em dois passos sequenciais:

i) Ajuste do Valor de Descarga

A vida útil das baterias se altera conforme a profundidade das descargas que ocorrem nela. O valor máximo de capacidade deve ser ajustado nesses termos. Existem dois ajustes a serem feitos:

- Ajuste para máxima profundidade de descarga (obtido dividindo a capacidade preliminar pela capacidade máxima de descarga da bateria).
- Ajuste para máxima profundidade de descarga diária (obtido dividindo os ampères-horas diários pela profundidade de descarga máxima diária para o tipo de bateria escolhido).

O maior dos valores encontrado deve ser usado.

ii) Ajuste por Temperatura

A capacidade das baterias se altera com o acréscimo ou com a diminuição da temperatura. Para valores de temperatura acima de 25° a capacidade aumenta e para os inferiores a esse valor, ela diminui.

Os valores referentes à correção da capacidade podem ser obtidos com os fabricantes e devem ser usados como um fator multiplicativo ao valor obtido pelo ajuste anterior (Ajuste do Valor de Descarga).

l) Fator de Correção do Projeto

Uma prática comum é acrescentar um valor de segurança a essa capacidade após as correções, multiplicando o valor encontrado por um número de 1,1 a 1,25, referenciando valores entre 10 a 25 % de segurança contra fatores aleatórios.

m) Tempo de Descarga Operacional

Em aplicações com consumo constante, o banco de baterias deve ter a capacidade de fornecer a corrente demandada pela carga durante todo o tempo de autonomia, porém em aplicações com correntes variáveis, o tempo de descarga deve ser calculado da seguinte forma:

- Comparar o maior valor de corrente não simultânea com a somatória de todas as correntes simultâneas demandadas pela carga e selecionar o maior valor.

- Dividir a capacidade ajustada anteriormente pelo valor calculado no item anterior.

n) O Número de Baterias do Banco

O número de baterias em série do banco é função direta da faixa de tensão de operação do sistema, sendo que esta é determinada pelo intervalo maior valor mínimo de tensão e pelo menor valor de tensão máxima do sistema, sendo obtido pela equação 10. A tensão de operação do sistema deve estar dentro dessa faixa, sendo que essa será usada no cálculo do número de baterias em série do sistema conforme equação 11:

$$N_{\max} = \frac{V_{\max}}{V_{\text{bat}}} \quad (10)$$

Onde  $V_{\max}$  é a tensão máxima da faixa de operação de tensões,  $V_{\text{bat}}$  é a tensão recomendada de uso da bateria pelo fabricante e  $N_{\max}$  o número de baterias a ser associado no sistema (valores arredondados para baixo e inteiros, necessariamente).

$$V_{fd} = \frac{V_{\min}}{N_{\text{bat}}} \quad (11)$$

Onde  $V_{\min}$  é a tensão mínima da faixa de operação de tensões,  $V_{fd}$  é a tensão final de descarga por bateria e  $N_{\text{bat}}$  o número de baterias associadas no sistema, calculado anteriormente.

o) Critérios para Configuração do Banco de Baterias

A seleção da bateria é feita conforme os requisitos calculados anteriormente, sendo descarregada no tempo de descarga operacional, até que atinja a tensão calculada na tensão final de descarga. Se não houver bateria no catálogo do fabricante que atenda a especificação, deve ser usada a de capacidade superior mais próxima. Caso não haja nenhuma bateria que atinja as especificações devem-se associar baterias em paralelo, selecionando a bateria adequada.

O número de baterias em paralelo deve ser calculado dividindo-se a capacidade encontrada corrigida pela capacidade da bateria escolhida, sendo que o número total de baterias do sistema é igual ao número de baterias em série, multiplicado pelo número de associações em paralelo calculadas. A capacidade total do sistema então pode ser calculada como sendo o resultado da multiplicação entre os conjuntos em paralelo e a capacidade nominal da bateria selecionada.

#### 2.2.4.1.1 Tensão de Operação

A tensão de operação deve ser escolhida de acordo com a necessidade do sistema em questão. Em primeiro momento, há a impressão de que ao aumentarmos a tensão, reduziremos a capacidade do acumulador, porém essa resposta é equivocada. Precisando-se de maior tensão CC, surge a necessidade de uma maior quantidade de células (SOARES; RECH, 2012).

#### 2.2.4.1.2 Quantidade de Acumuladores

A capacidade da bateria usada no sistema é o fator principal em termos de definição da quantidade de células necessárias no total do acumulador, expressa pela Equação 12. Deve-se escolher criteriosamente o modelo e a eficiência para tornar o acumulador mais confiável (SOARES; RECH, 2012).

$$B_n = \frac{C_n}{C_b} \quad (12)$$

Onde:

$B_n$  = Quantidade de baterias

$C_b$  = Capacidade das baterias utilizadas

$C_n$  = Capacidade total do acumulador

### 2.2.5 Características Ideais para Uso em Sistemas Fotovoltaicos

De acordo com Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos da CRESESB (2004), as baterias presentes em um sistema solar fotovoltaico devem atender a dois tipos de ciclo, para situações diferentes. O primeiro tipo é o raso, que ocorre com frequência diária. O segundo é o profundo, que pode ocorrer durante um tempo mais prolongado, quando o tempo permanece nublado ou mesmo em semanas de pouca geração, no inverno. Este tipo de ciclo ocorre quando a carga não é suficiente para a reposição da carga usada pelo sistema durante o dia. Quando há um aumento na irradiância, ocorre um carregamento extra, aumentando o estado de carga após o ciclo diário.

Abaixo vem uma lista de características desejáveis na escolha de baterias para um sistema fotovoltaico (SOARES; RECH, 2012):

- Alta vida cíclica no caso de descargas profundas;
- Baixa necessidade de manutenção;
- Alta eficiência na operação de carga.
- Baixa taxa de auto-descarga;
- Confiabilidade;
- Pouca mudança no desempenho quando se trabalhando fora da faixa de temperatura de operação.
- Disponibilidade dos fornecedores;
- Distância, duração e custo do transporte para o local de uso;
- Custo da capacidade útil para um ciclo;
- Custo da capacidade útil para o ciclo de vida;
- Necessidade de manutenção durante o armazenamento;
- Peso;
- Densidade de energia;
- Disponibilidade e custo das unidades de controle, se necessário.

Mesmo que as baterias chumbo-ácido, que são projetadas para curtos períodos de rápida descarga, sejam as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, as níquel-cádmio apresentam características mais apropriadas. Essas baterias não apresentam problemas com ciclos profundos ou com sulfatação e podem ser

deixadas descarregadas. O elevado custo, entretanto, tem limitado o seu uso (SOARES; RECH, 2012).

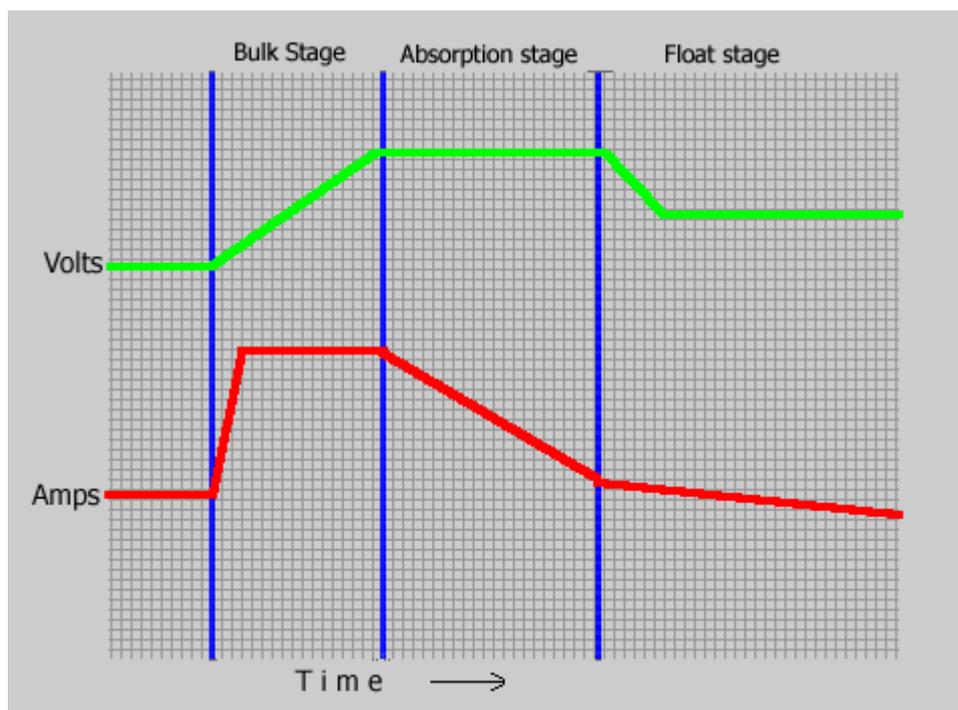
### 2.3 CONTROLADORES DE CARGA

Os controladores de carga são usados na maioria dos sistemas fotovoltaicos. Eles têm o objetivo básico de facilitar a máxima transferência de energia dos painéis fotovoltaicos para as baterias e protegê-las contra cargas e descargas excessivas, aumentando a sua vida útil (CRESESB, 2004).

O controlador é usado para manter a tensão adequada de carregamento das baterias, quando ocorre um aumento da tensão do painel ele controla a carga das baterias evitando o excesso de carga. Tem a função de bloquear corrente reversa e evitar a sobrecarga das baterias, e em alguns casos sua descarga profunda também. Pode ainda, ter proteção contra sobrecarga elétrica, mostrar o status da bateria e do fluxo de energia (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

Os controladores de carga de maior qualidade possuem três estágios de operação, ilustrados na Figura 33:

- **CARGA:** nesta fase a tensão aumenta gradualmente até a tensão da bateria alcançar 14,4 V – 14,6 V, momento em que as baterias drenam a corrente máxima. Ao chegar nesta tensão começa o estágio de absorção.
- **ABSORÇÃO:** nesta etapa a tensão é mantida no nível de tensão de carga durante um determinado tempo, geralmente uma hora, enquanto que o valor da corrente diminui gradualmente com a carga da bateria.
- **FLUTUAÇÃO:** após a absorção a tensão é reduzida para a tensão de flutuação, que é de 13,4 V – 13,7 V e as baterias drenam uma pequena corrente de manutenção até o ciclo seguinte (FREE SUN POWER, 2012).



**Figura 33 - Estados de operação de um controlador de carga.**

Fonte: *Free Sun Power* (2012).

O controlador é instalado eletricamente entre o painel fotovoltaico e as baterias. Geralmente um controlador possui entrada para os painéis fotovoltaicos, saída para as baterias e saída para carga (em corrente contínua). Caso exista a necessidade da conversão para corrente contínua, nesta saída é conectado um inversor CC/CA (MINHA CASA SOLAR, 2012).

### 2.3.1 Bloqueio de Corrente Reversa

A corrente oriunda dos painéis fotovoltaicos que alimentam as baterias, sendo esta CC, possui uma única direção. No entanto, à noite, quando os painéis não estão fornecendo energia às baterias, pode existir uma corrente reversa, que acaba causando uma leve descarga da bateria ou banco de baterias. Esta potência é baixa, mas esta perda pode ser evitada.

Em grande parte dos controladores de carga, a corrente de carga passa através de transistores, os quais servem como válvulas de controle da corrente. Por serem semicondutores, desta forma permitindo o fluxo da corrente somente em um

sentido, impedem que exista um fluxo reverso da corrente. Em alguns controladores esta corrente reversa é bloqueada pelo acionamento de relés no período da noite (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

### 2.3.2 Prevenção de Sobrecarga das Baterias

Ao atingir a carga completa a bateria não possui mais capacidade para armazenar a energia que lhe for enviada. Se a taxa do fluxo de energia permanecer máxima, a tensão da bateria ficará muito alta. Desta forma, existe uma excessiva perda de água pela separação em hidrogênio e oxigênio que borbulham rapidamente, existindo ainda a chance desses gases ocasionarem uma pequena explosão. A bateria degradará rapidamente e poderá superaquecer. A tensão alta da bateria pode ainda estressar as cargas as quais alimenta ou desligar o inversor.

A prevenção de uma sobrecarga pode ser feita com a simples redução do fluxo de energia que chega até a bateria quando esta chega a uma tensão específica. Sendo que se ocorrer um aumento da carga demandada ou uma redução da intensidade de luz solar, resultando numa menor potência fornecida pelo painel fotovoltaico, o controlador de carga verificará a tensão da bateria e poderá retomar o fluxo de carga em resposta. Este procedimento é chamado de “Regulação de tensão” sendo a função mais importante de um controlador de carga.

A regulação do fluxo de energia para a bateria pode ser feita pelo método de alternância entre “ligado e desligado”, chamado “controle *ON/OFF*”, como também pela redução gradual da corrente de carga, chamada modulação de largura de pulso (PWM), do inglês “*pulse width modulation*”. Sendo os dois métodos eficazes quando configurados de maneira adequada para o tipo de bateria usado.

A regulação PWM consegue manter a tensão na bateria mais constante. Se possuir duplo estágio de regulação, primeiramente levará a bateria a uma tensão de carga máxima segura, para então abaixar a tensão para sustentar uma tensão de flutuação, isto mantém a bateria em plena carga sem desperdício de água ou depreciação.

As tensões onde ocorre a alternância de taxa de carga são chamadas *set points*, em português, pontos de ajuste. Sendo estes possíveis de serem ajustados ou não, dependendo do controlador. A aferição desses pontos depende de padrões esperados de uso, do tipo de bateria, bem como das peculiaridades do sistema fotovoltaico desenvolvido e da experiência do operador. Também se faz necessário uma correlação entre o carregamento rápido antes do pôr do sol e a leve sobrecarga da bateria. Este sistema de regulação se torna importante para sistemas fotovoltaicos que possuem excesso de energia durante demasiados dias, ou sistemas com pouca demanda (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

### 2.3.3 *Set Points* x Temperatura

Os pontos ideais de controle variam de acordo com a temperatura da bateria. Há ainda controladores que têm a capacidade de fazer uma compensação de temperatura. Quando este controlador detectar uma temperatura de bateria fraca, ele aumentará os *set points*. Caso a bateria esteja fria, ele reduzirá a carga precocemente. A compensação é essencial quando as baterias estão expostas a variações de temperatura superiores a 17 °C.

Existem controladores que já possuem sensores de temperatura em sua estrutura, desta forma é necessário que o controlador esteja em um local onde a temperatura seja próxima a da bateria. No entanto, existem controladores que possuem sensores térmicos, termopares, que podem ser levados até o local onde se encontra a bateria e serem conectados diretamente a elas.

Alternativa encontrada é o ajuste manual dos *set points*, quando este ajuste é possível, de acordo com as estações do ano, podendo ser realizado somente duas vezes no ano, na primavera e no outono (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

#### 2.3.4 Set Points x Tipo de Bateria

Os *set points* ideais variam de acordo com o tipo de bateria utilizada. As baterias chumbo-ácido de ciclo profundo são o tipo de bateria mais usado nos sistemas renováveis de energia sejam seladas ou não.

Há controladores de carga capazes de selecionar o tipo de bateria. No entanto, o uso de um controlador deverá ser realizado somente para o tipo de bateria para o qual foi confeccionado, caso esse ajuste não seja possível, ou ajustado, quando este ajuste é feito manualmente (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

Como exemplo, os valores típicos de ajuste para baterias chumbo ácidas de 12 V a 25 °C são os seguintes:

- Limite superior de tensão (não selada): 14,4 V;
- Limite superior de tensão (selada): 14,0 V;
- Limite superior de tensão (não selada): 14,4 V;
- Carga completa: 13,0 V;
- Limite mínimo de tensão (LVD – tensão mínima de desconexão): 10,8 V;
- Re-conexão: 12,5 V;
- Compensação por temperatura (bateria de 12 V): 0,03 V/°C de desvio padrão 25 °C.

#### 2.3.5 Tensão Mínima de Desconexão (LVD)

As baterias de ciclo profundo usadas nos sistemas de energia renováveis são projetadas para descarregarem cerca de 80 %. Se ocorrer um descarregamento completo (100 %) elas serão danificadas permanentemente. Portanto, se elas forem usadas até o momento que a tensão baixa já se torne perceptível na carga, algum dano elas já terão sofrido. Sempre que ocorre esta situação a vida útil da bateria é reduzida um pouco mais. Se a bateria permanecer nesta situação por um grande período de tempo a vida útil dela se esgotará muito rapidamente.

Uma maneira de evitar a descarga profunda da bateria é desligar as cargas conectadas na bateria e reconectá-las somente após a recarga da mesma. Uma

bateria de 12 V chega a ficar com uma tensão inferior a 11 V ao chegar próxima da descarga profunda da bateria.

A tensão mínima de desconexão (LVD) é um *set point* onde o controlador desliga as cargas ligadas à bateria. Cargas estas, que serão ligadas novamente somente após que a tensão da bateria estiver suficientemente alta devido à recarga da mesma. Sendo que para baterias de 12 V este *set point* de restabelecimento da carga é de geralmente 13 V (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

### 2.3.6 Proteção contra Sobrecargas

A sobrecarga acontece quando a fluxo de corrente exigido pela carga supera o controlável com segurança, podendo causar um sobreaquecimento. A sobrecarga pode acontecer devido curto-circuito na fiação ou um defeito em alguma carga. Há controladores de carga que já possuem proteção contra sobrecargas embutido, na maioria das vezes com um botão de *reset*. No entanto, frequentemente se faz necessário um sistema de proteção adicional usando fusíveis ou disjuntores. Isto se torna evidente quando a fiação de seu circuito possui uma capacidade de corrente (ampacidade) inferior ao limite de sobrecarga do controlador (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

### 2.3.7 Dimensionamento do Controlador de Carga

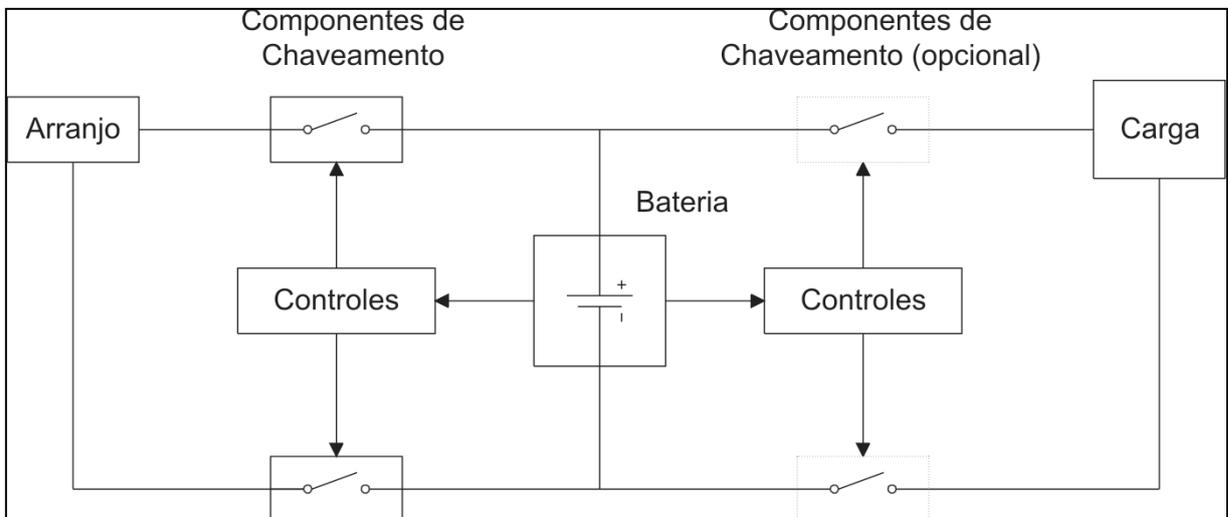
Os controladores de carga são especificados basicamente pela sua tensão e corrente de operação. É necessário que o controlador de carga tenha tensão nominal igual a da bateria e do painel fotovoltaico usado, bem como uma capacidade de corrente suficiente para a corrente oriunda do painel fotovoltaico.

Para dimensionar um controlador de carga para o sistema fotovoltaico de maneira prática, geralmente usa-se como parâmetro a corrente de curto circuito do painel e a multiplica por 1,56 (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

### 2.3.8 Tipos de Controladores de Carga

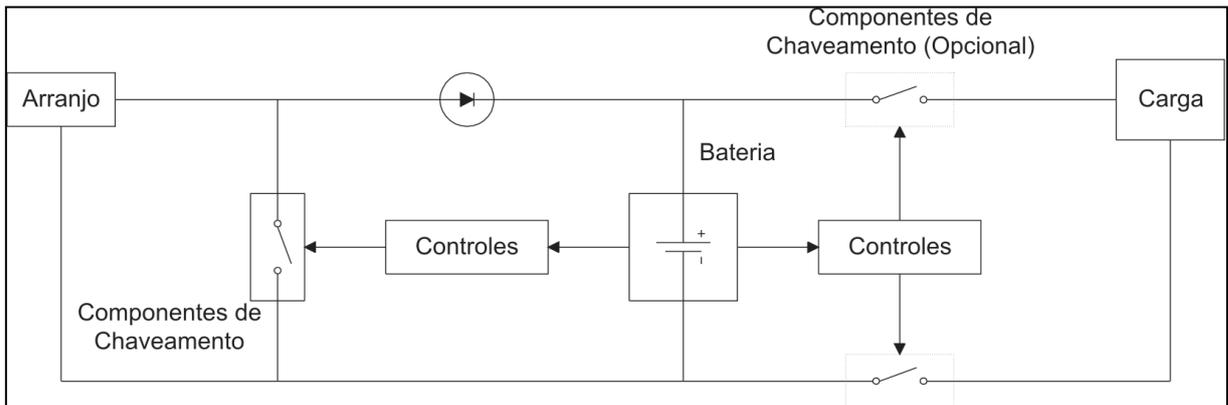
Com o dimensionamento do controlador a partir dos valores de tensão e corrente, deve-se identificar o tipo de controlador correto para a aplicação de destino: MPPT, PWM, e os controladores *shunt* PWM.

Os controladores PWM são o tipo mais tradicional. São robustos, de baixo custo e são amplamente usados em sistemas fotovoltaicos (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012). Seu esquema de ligação no circuito é ilustrado na Figura 34.



**Figura 34 - Controlador de carga PWM com LVD opcional.**  
**Fonte: CRESESB (2004).**

Os controladores *shunt* PWM são menos usados e se aplicam principalmente onde a interferência elétrica é um problema (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012). Seu esquema de ligação no circuito é ilustrado na Figura 35.



**Figura 35 – Controlador de carga PWM Shunt com LVD opcional.**  
**Fonte: CRESESB (2004).**

Os controladores MPPT são os mais novos e mais eficientes atualmente. Eles podem detectar a tensão e corrente ótima de operação dos painéis fotovoltaicos e as combinar com o banco de baterias. Desta forma acabam conseguindo um acréscimo de 15 % a 30 % na eficiência dos painéis fotovoltaicos, quando comparado com o controlador PWM. No entanto, o custo desse tipo de controlador é superior aos do tipo PWM, tornando o investimento válido quando se trabalha com sistemas fotovoltaicos de potência superior a 200 W (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

## 2.4 INVERSORES

O inversor é um equipamento eletrônico responsável pela conversão da corrente contínua CC oriunda das baterias, painel fotovoltaico, ou demais fontes, em uma corrente alternada CA (ELECTRÓNICA, 2012). Ele é ainda responsável pelo aumento da tensão para o valor da tensão de serviço fornecido pela rede elétrica, geralmente de 127 V ou 220 V.

Desta maneira se torna possível que um sistema fotovoltaico isolado alimente cargas convencionais que, em sua grande maioria, operam somente em corrente alternada.

Um inversor é um equipamento complexo, que precisa trabalhar com variações na tensão de entrada que chegam a 35 %, devido a variações do estado

da bateria, bem como grandes variações na demanda da carga, com a entrada de cargas de maior potência (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

Alguns fatores são de suma importância para a escolha de um inversor. Dentre eles pode-se destacar: o local onde ele será aplicado; os valores de tensão CC de entrada assim como os valores de tensão CA e frequência da saída; a potência de saída; a forma de onda da saída, que implica diretamente na qualidade da energia elétrica fornecida; e nível de proteção; entre outros fatores (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

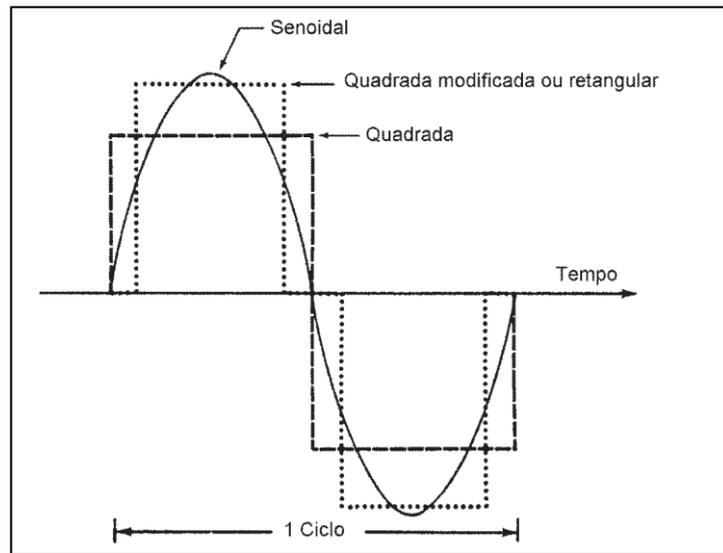
#### 2.4.1 Qualidade de Energia

A forma de onda da tensão de saída implica na qualidade da energia elétrica fornecida, desta forma há inversores mais “limpos” que outros.

Os inversores podem ter sua tensão de saída em onda senoidal modificada. Eles possuem uma forma de onda inferior, com alternância irregular. São adequados para ambientes residenciais que possuam cargas simples, mas com o mau funcionamento de cerca de 5 % das cargas residenciais. Podem favorecer o superaquecimento das fontes de alguns aparelhos, como por exemplo, computadores, assim como de protetores contra surtos, podem ainda provocar zumbidos em lâmpadas fluorescentes e transformadores, por exemplo. Em motores e transformadores ocorre ainda, juntamente com o aquecimento, a redução de sua eficiência em 10 % ou mais. Acaba reduzindo a confiabilidade dos aparelhos. No entanto são mais baratos que os inversores de onda senoidal pura.

Os inversores de onda senoidal pura apresentam uma tensão de saída muito mais limpa que os de senoidal modificada. São ideais para cargas indutivas mais sensíveis como motores. São mais caros que os inversores de onda senoidal modificada (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

As formas de onda para os tipos de inversores podem ser vistas na Figura 36.



**Figura 36 - Formas de onda típicas de inversores monofásicos.**

Fonte: CRESESB (2004).

#### 2.4.2 Eficiência

O inversor possui uma eficiência que varia com a carga. Seu rendimento é tipicamente superior a dois terços de sua potência. Isto é chamado de “máxima eficiência”, como o inversor precisa de certa potência para operar, ao suprir pequenas cargas seu rendimento fica abaixo do esperado.

Em um ambiente residencial, em certos momentos do dia, a demanda é muito baixa. Nestes momentos a eficiência do inversor pode chegar a valores inferiores a 50 %. Existe uma “curva de eficiência” para cada inversor onde é mostrada a eficiência pela carga (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

#### 2.4.3 Desligamento automático

Como o inversor precisa de energia mesmo quando estiver “ocioso”, sem suprir as cargas, ele pode ser visto como uma carga de substancial valor para um sistema fotovoltaico de pequeno porte. Os inversores de mais baixo custo possuem

chaves manuais de desligamento. Portanto, se for esquecido ligado, após alguns dias é provável que o banco de bateria esteja descarregado.

A maioria dos inversores feitos para os sistemas fotovoltaicos possuem um sistema automático de desligamento. Ele emite um pulso sobre cada segundo, aproximadamente. Ao entrar alguma carga, ele a sente e liga. Esta função pode ser chamada “modo de espera”, “economia de energia” ou “*standby*”.

Esta função pode não operar corretamente para pequenas cargas. O limite de potência para fazer com que o inversor comece a operar pode ser de 10 W ou 15 W. Portanto, esses inversores possuem uma função que os deixam ligados por tempo integral. Assim o projetista deverá adicionar a corrente de repouso do inversor nos cálculos de carga durante as 24 horas do dia, desta forma encarecendo proporcionalmente o custo do sistema (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

#### 2.4.4 Características como carregador de baterias

Existem inversores capazes de carregar as baterias, quando descarregadas, a partir da aplicação de uma tensão alternada ou oriunda da rede elétrica. Esta função tem grande importância na maioria dos sistemas renováveis de energia, pois existe a possibilidade do fornecimento de energia dos painéis não serem suficientes. Desta forma, os inversores servem como um sistema de emergência completo para as necessidades de um sistema *on-grid* de potência.

Algumas especificações relevantes para a função de carregador de baterias são: Taxa de carga máxima (em ampères); dimensionamento do gerador e requisitos de tensão; requisitos de controle de carga (incluindo tipo de bateria); compensação de temperatura; entre outros fatores (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

#### 2.4.5 Expansão de capacidade

Para expandir a capacidade de potência dos inversores, alguns deles permitem que sejam conectados em paralelo (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

#### 2.4.6 Cargas fantasmas

Existem muitas cargas que absorvem energia durante tempo integral apenas por estarem plugadas ao sistema, sem que de fato estejam ligadas, operando suas funções, estão são as chamadas “cargas fantasmas”. São chamadas desta forma por serem facilmente esquecidas, “invisíveis”. Como exemplo, temos uma televisão com controle remoto que permanece em “*standby*” durante todo tempo que estiver conectada a uma fonte de energia elétrica.

Existem algumas formas de lidar com esse tipo de carga: simplesmente evitá-las, quando se trata de um sistema simples de cargas; minimizar sua presença ou desconectá-los do sistema quando não forem necessários; criar sistemas periféricos que sejam capazes de desconectá-los; pagar um sistema grande o suficiente que consiga lidar com cargas extras juntamente com a carga do inversor quando em “*standby*” (ALTERNATIVE ENERGY STORE, 2012).

#### 2.4.7 Proteções

Há dois tipos de proteções importantes para não danificar os inversores: proteção contra sobre-tensão na entrada e contra sobrecargas e elevação de temperatura.

Uma bateria de 12 V pode chegar a 16 V ou mais, este acréscimo de tensão pode não ser suportável para todos os inversores e danificá-lo. A maioria dos

inversores possui sensores capazes de detectar essas elevações danosas e desconectarão o inversor da bateria.

Para impedir danos ao inversor é recomendado que existam controles para desligá-lo quando for excedida a sua capacidade máxima de carga ou caso sua temperatura de operação exceda um limite seguro (CRESESB, 2004).

#### 2.4.8 Fator de potência

Um fator de potência elevado, ou seja, próximo de um, é sempre o valor mais desejado, por reduzir as correntes necessárias e assim maximizar a transferência de potência à carga. No entanto, em sistemas residenciais existem muitas cargas com características indutivas e fator de potência que podem chegar a 0,5. Existem inversores de maior qualidade capazes de compensar esse fator de potência e manterem o fator de potência próximo de um. O inversor deverá possuir um fator de potência compatível com o de suas cargas (CRESESB, 2004).

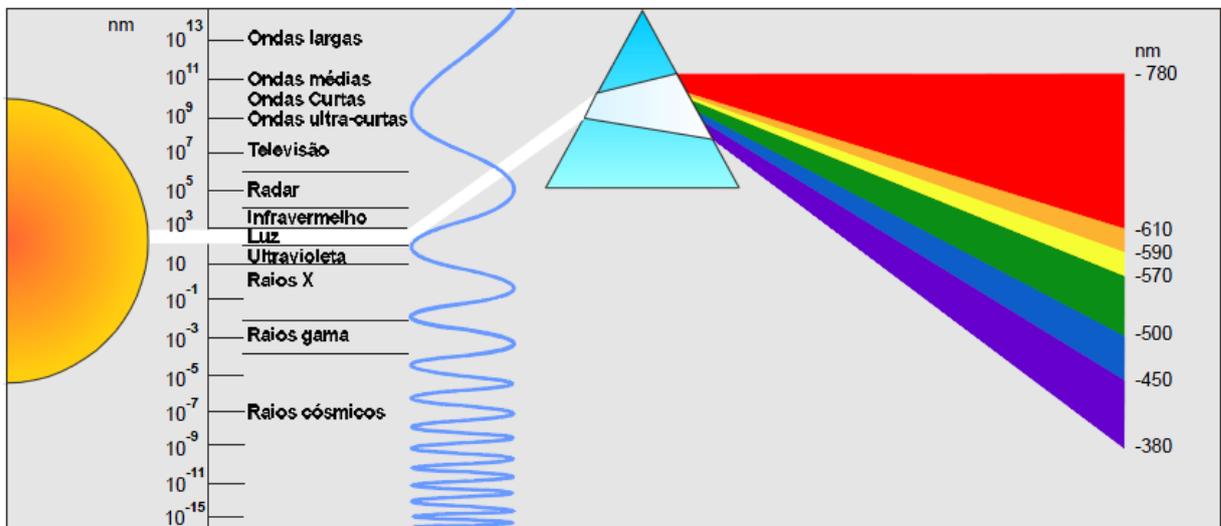
#### 2.4.9 Taxa de utilização

A taxa de utilização está associada com o tempo de funcionamento do inversor em sua capacidade máxima de potência. Sendo que sua extrapolação poderá lhe levar a falhar (CRESESB, 2004)

## 2.5 LUMINOTÉCNICA

### 2.5.1 A luz e a visão

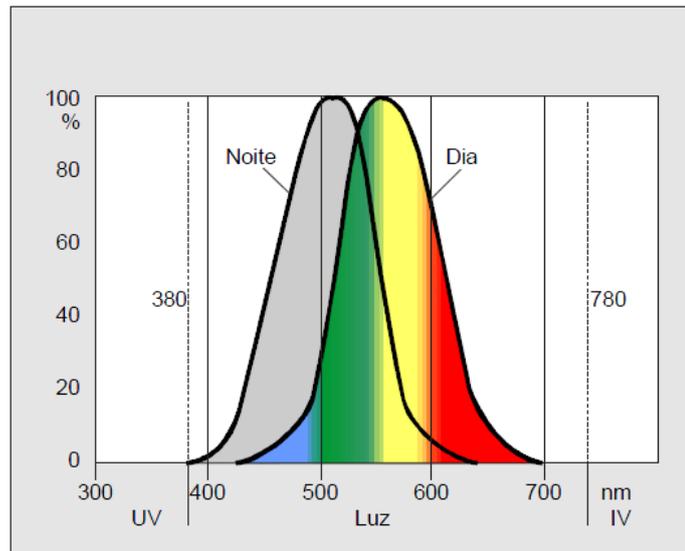
A radiação emitida por uma fonte pode possuir ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos de onda como pode ser visto na Figura 37. No entanto, o olho humano é sensível somente a faixa que se encontra entre 380 e 780 nm. Nos limites desses comprimentos de onda se encontram as ondas ultravioletas, com comprimentos de onda inferiores a 380 nm, e as ondas infravermelhas, com comprimentos de onda superiores a 780 nm (OSRAM DO BRASIL, 2012).



**Figura 37 - Espectro eletromagnético.**

Fonte: Adaptado de Manual Luminotécnico Prático da OSRAM (2012).

A sensibilidade do olho humano mesmo para esses de comprimentos de onda não é igual (Figura 38). Quando há pouca luz, a sensibilidade é maior para as radiações de comprimentos de onda menores, correspondentes a sensação de cores como azul e violeta, enquanto que quando há muita luz o comportamento é inverso, a sensibilidade se torna maior para as radiações de maior comprimento de onda, correspondentes as cores laranja e vermelha (OSRAM DO BRASIL, 2012).



**Figura 38 - Curva de sensibilidade do olho humano a radiações monocromáticas.**

**Fonte: Adaptado de Manual Luminotécnico Prático da OSRAM (2012).**

## 2.5.2 Conceitos luminotécnicos

### 2.5.2.1 Fluxo luminoso ( $\phi$ )

O fluxo luminoso é a quantidade de luz visível emitida por uma fonte em tensão nominal de funcionamento. É medido em lumens (lm) (SALES, 2011).

### 2.5.2.2 Intensidade luminosa (I)

É a intensidade do fluxo luminoso em uma determinada direção. É medida em candela (cd) (SALES, 2011).

### 2.5.2.3 Iluminância (E)

Relaciona o fluxo luminoso incidente em uma superfície com sua área, ou seja, é a densidade de fluxo luminoso incidente em uma superfície. Tem como unidade o lux (lx) (SALES, 2011). A iluminância pode ser expressa pela equação 13.

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (13)$$

### 2.5.2.4 Coeficiente de Reflexão ( $\rho$ )

Relação entre o fluxo luminoso refletido e o fluxo luminoso incidente em uma superfície. Normalmente é tabelado em função das cores e materiais utilizados.

### 2.5.2.5 Luminância (L)

Intensidade luminosa produzida ou refletida por uma determinada superfície aparente, meio pelo qual o ser humano enxerga, sensação de claridade. Medida em candela por metro quadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) (SALES, 2011).

É determinada pela equação 14:

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos \alpha} \quad (14)$$

Onde:

L = Luminância [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ];

I = Intensidade luminosa [cd];

A = Área projetada [ $\text{m}^2$ ];

$\alpha$  = ângulo considerado em graus [°].

Pela dificuldade em medir a intensidade luminosa de um corpo não radiante, por meio da reflexão, recorre-se a equação 15:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (15)$$

Onde:

L = Luminância [cd/m<sup>2</sup>];

$\rho$  = Refletância ou coeficiente de reflexão;

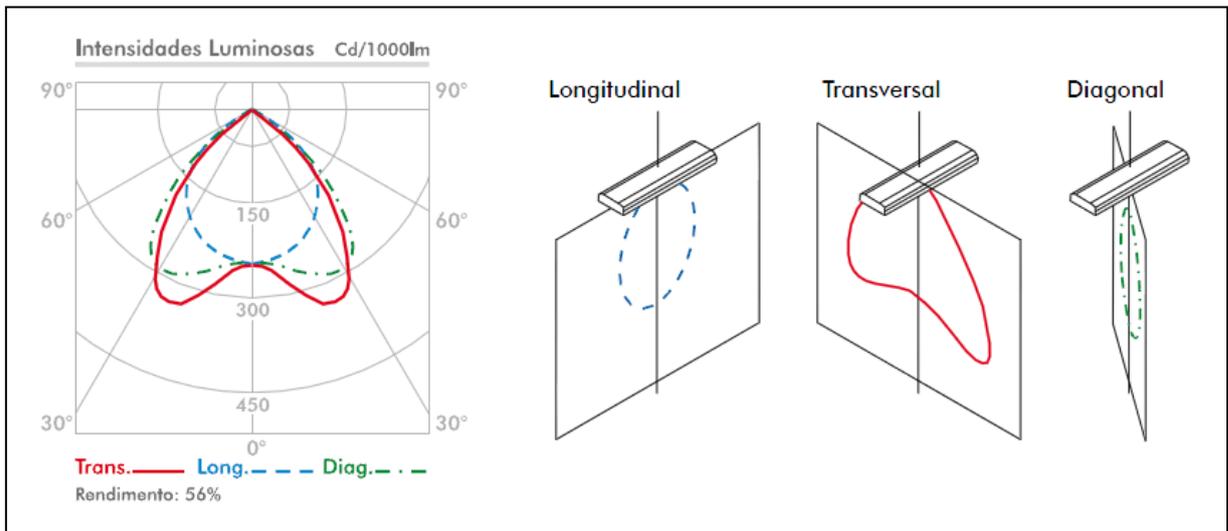
E = Iluminância sobre a superfície.

O fato dos objetos refletirem a luz de maneiras diferentes torna possível que uma mesma iluminância dê origem a diferentes luminâncias, que esta ligada com a sensação do ser humano (OSRAM DO BRASIL, 2012).

#### 2.5.2.6 Curva de distribuição luminosa (CDL)

Representa a distribuição espacial da intensidade luminosa de uma lâmpada ou luminária. A curva indica, por meio de um diagrama polar, a intensidade luminosa em planos que atravessam a luminária ou lâmpada, em função do ângulo sólido de um esferoradiano. Tem como unidade o candela por 1000 lumens do fluxo nominal da lâmpada (OSRAM, 2012).

Normalmente, são apresentados 3 planos: um no eixo longitudinal (C0° - C180°), um no plano transversal (C90° - C180°) e outro no eixo diagonal (C45° - C225°)(ITAIM, 2008).



**Figura 39 - Curva de distribuição luminosa (CDL) e os planos de corte.**  
**Fonte: Adaptado de Catálogo geral de produtos ITAIM (2008).**

A curva de distribuição luminosa indica ainda o tipo da distribuição de luz, se ela é concentrada, difusa, simétrica ou assimétrica (OSRAM, 2012).

### 2.5.3 Temperatura de Cor (T)

Conforme o Manual Luminotécnico Prático da OSRAM (2012), a temperatura de cor está ligada com a aparência de cor da luz, com a tonalidade que ela dá ao ambiente. Quanto mais branca a cor da luz, mais alta será sua temperatura de cor. Esta ligada com a temperatura de um corpo metálico que, ao ser aquecido, passa desde o vermelho até o branco. Por exemplo, a temperatura de cor da luz diurna de meio-dia é de aproximadamente 6500 K, enquanto que a de uma lâmpada incandescente esta em torno de 2700 K. Tem como unidade o Kelvin [K].

Do ponto e vista psicológico, a temperatura de cor pode tornar o ambiente mais aconchegante e convidativo, dando uma sensação de luz “quente”, quando esta apresentar uma tonalidade mais amarelada, portanto uma temperatura de cor de fato menor. Geralmente se encontra este tipo de temperatura de cor em ambientes residenciais como quartos e salas de estar. Quando a temperatura de cor apresentar valores altos, sendo assim uma cor mais branca, dará uma sensação de luz “fria”, dando a sensação de limpeza, alerta, tornando o ambiente propício a

realização de tarefas. Característica importante em ambientes onde exige-se atenções tais como escritórios, cozinhas e locais de trabalho.

A temperatura de cor não tem relação com a eficiência energética (OSRAM DO BRASIL, 2012).

#### 2.5.4 Índice de Reprodução de Cor (IRC)

O índice de reprodução de cor faz a correspondência entre a cor das superfícies e sua aparência sob uma fonte de referência. Isto se deve ao fato de percebermos o reflexo da luz sobre os objetos iluminados. As cores podem ter IRC de 1 a 100 e serão mais fielmente representadas quando se tem IRC 100 %, que corresponde ao índice de reprodução de cores da luz solar.

A capacidade de uma fonte reproduzir de maneira fiel as cores independe de sua temperatura de cor, podendo haver fontes com um mesmo IRC e diferentes temperaturas de cor (OSRAM DO BRASIL, 2012).

#### 2.5.5 Eficiência Energética

A relação entre o fluxo luminoso e a potência consumida por uma fonte resulta em sua eficiência energética. Sua medida é feita em lumens por Watt [lm/W] (OSRAM DO BRASIL, 2012).

#### 2.5.6 Fundamentos do Projeto Luminotécnico

Conforme o Manual Luminotécnico Prático da OSRAM (2012), um projeto luminotécnico pode ser resumido em:

- Escolha da lâmpada e luminária mais adequada;
- Cálculo da quantidade de luminárias;

- Disposição das luminárias no recinto;
- Cálculo da viabilidade econômica.

Recomenda-se ainda uma metodologia para se estabelecer uma seqüência lógica dos cálculos:

- Determinação dos objetivos da iluminação e dos efeitos que se pretende alcançar.
- Levantamento das dimensões físicas do local, *lay-out*, materiais utilizados e características da rede elétrica no local.
- Análise dos Fatores de Influência na Qualidade da Iluminação.
- Cálculo da iluminação geral (Método das Eficiências).
- Adequação dos resultados ao projeto.
- Cálculo de controle.
- Definição dos pontos de iluminação.
- Cálculo de iluminação dirigida.
- Avaliação do consumo energético.
- Avaliação de custos.
- Cálculo de rentabilidade.

Alguns dos fatores que influenciam na qualidade da iluminação são listados a seguir.

#### 2.1.6.1 Nível de Iluminância Adequada

Os valores de iluminância adequados para cada tarefa ou ambiente são encontrados na norma NBR 5413 – Iluminância de interiores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992). Os valores de iluminância pertinentes a este trabalho são encontrados no ANEXO B, por tipo de atividade, e no ANEXO C, por classe de tarefas visuais. No ANEXO C estão os critérios para a escolha da iluminância adequada apresentadas nos supracitados anexos.

### 2.1.6.2 Limitação de Ofuscamento

O ofuscamento pode trazer incômodos pelo ofuscamento direto, por meio da luz direcionada diretamente ao campo visual, ou pelo ofuscamento reflexivo, por meio da reflexão da luz no plano de trabalho, direcionando-a ao campo de visão.

Valores de luminância da própria luminária a partir de 200 cd/m<sup>2</sup> são considerados incômodos, desta forma valores superiores a estes não devem ultrapassar um ângulo de 45° em relação a um eixo vertical perpendicular ao plano de fixação da luminária (OSRAM DO BRASIL, 2012).

### 2.1.6.3 Harmonia entre Luminâncias

Grandes diferenças entre as luminâncias de diferentes planos causam uma fadiga visual, por forçarem a vista a se adaptar as variações bruscas de sensação de claridade. Esse desconforto pode ser evitado harmonizando as luminâncias do teto, parede e piso numa proporção 3:2:1, e no caso de uma mesa de trabalho, a luminâncias seja igual ou superior a um terço da luminância do objeto observado (OSRAM DO BRASIL, 2012).

### 2.1.6.4 Efeitos de luz e sombras

Uma boa iluminação não significa uma distribuição por igual da luz. Há a necessidade de que existam sombras para uma melhor identificação de textura e formato dos objetos. No entanto, deve-se evitar a criação de sombras perturbadoras, devido o direcionamento do foco de uma luminária (OSRAM DO BRASIL, 2012).

#### 2.1.6.5 Tonalidade de Cor da Luz e reprodução das Cores

A reprodução das cores esta diretamente ligada com a qualidade da luz incidente, ou seja, com o equilíbrio de distribuição das ondas constituintes de seu espectro. É regulamentada dependendo da atividade a ser desempenhada no local.

A tonalidade de cor é um dos requisitos para atingir um conforto visual e dar ao ambiente um aspecto desejado. De acordo com a correta tonalidade de cor da fonte de luz ao nível de iluminância pretendido pode-se obter um ambiente que provoque uma sensação de aconchego ou estímulo. Para iluminâncias mais elevadas são necessárias fontes com uma temperatura de cor também mais elevada (OSRAM DO BRASIL, 2012).

#### 2.1.6.6 Fatores de desempenho

Geralmente as lâmpadas são instaladas dentro de luminárias, isso acarreta numa diminuição do fluxo luminoso irradiado devido reflexões e transmissões da luz pelos materiais que constituem a luminária.

O fluxo final emitido pelo conjunto final luminária com a lâmpada é avaliado pela eficiência da luminária. Esse valor é geralmente indicado pelos fabricantes, mas existem valores médios tabelados para luminárias em geral agrupados por tipos.

Existe um influencia significativa das características físicas do recinto de instalação da luminária, dependendo absorção e reflexão dos materiais e da trajetória até o plano de trabalho. O valor da eficiência do recinto é tabelado onde relaciona-se a influência dos coeficientes de reflexão do teto, paredes e piso, com a curva de distribuição luminosa da luminária usada e o índice do recinto.

O índice do recinto permite classificar diferentes ambientes e pode ser obtido pela equação 16. Para ambientes retangulares a equação 16 pode ser simplificada, tendo como resultado a equação 17 que serve para a iluminação direta (PROCEL, 2013).

$$K = \frac{\Sigma A_t + A_{pt}}{A_p} \quad (16)$$

Onde:

K = índice do ambiente;

$A_t$  = Área do teto [m<sup>2</sup>];

$A_{pt}$  = Área do plano de trabalho [m<sup>2</sup>];

$A_p$  = Área de parede entre o plano iluminante e plano de trabalho [m<sup>2</sup>].

$$K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} \quad (17)$$

Onde:

K = índice do ambiente para iluminação direta;

a = comprimento total do ambiente [m];

b = largura total do ambiente [m];

h = altura entre o plano de trabalho e o plano das luminárias no teto (pé-direito útil) [m].

O fluxo luminoso útil sobre o plano de trabalho é avaliado pelo fator de utilização, que indica a eficiência luminosa do conjunto da luminária, lâmpada e do recinto. O fator de utilização é dado pela equação 18:

$$Fu = \eta_L \cdot \eta_R \quad (18)$$

Onde:

Fu = Fator de Utilização;

$\eta_L$  = eficiência da luminária;

$\eta_R$  = eficiência do recinto.

Com o uso, o fluxo emitido pela luminária e pela lâmpada diminui. Este fato é causado fatores como: a diminuição do fluxo luminoso da lâmpada ao longo de sua vida útil; poeira e sujeira depositadas nas luminárias e lâmpadas; diminuição da capacidade de reflexão de tetos e paredes em decorrência do acúmulo de sujeira ou escurecimento. A ocorrência desta diminuição do fluxo inicial com o tempo deve ser ponderada para os cálculos e recebe o nome de Fator de depreciação (Fd). Os valores desse fator são geralmente tabelados.

No Manual Luminotécnico Prático da OSRAM (2012), o fator de depreciação é estipulado em 1,25 para ambientes onde existe uma boa manutenção e 1,67 para ambientes de manutenção crítica.

#### 2.1.6.7 Cálculo da Iluminância Geral (Método das Eficiências)

Pelo método das eficiências primeiramente se escolhe a lâmpada adequada, então a luminária adequada ao tipo de lâmpada escolhido e ao recinto de instalação e por fim, calcula-se a quantidade de luminárias necessárias (OSRAM DO BRASIL, 2012). Contudo podemos encontrar primeiramente o fluxo luminoso necessário pela equação 19:

$$\Phi = \frac{E_m \cdot A \cdot F_d}{\eta_L \cdot \eta_R} \quad (19)$$

Onde:

$E_m$  = iluminância média do recinto (vide NBR 5413);

$A$  = área do recinto [ $m^2$ ];

$F_d$  = fator de depreciação;

$\Phi$  = fluxo luminoso necessário;

$\eta_L$  = eficiência da luminária;

$\eta_R$  = eficiência do recinto.

Desta maneira, por meio do fluxo luminoso individual de cada lâmpada ( $\varphi$ ), podemos encontrar a quantidade necessária de lâmpadas para que seja alcançado o fluxo luminoso total necessário no ambiente. Esta relação é dada pela equação 20.

$$n = \frac{\Phi}{\varphi} \quad (20)$$

Onde:

$n$  = quantidade de lâmpadas;

$\Phi$  = fluxo luminoso total necessário;

$\varphi$  = fluxo luminoso por lâmpada.

#### 2.1.6.8 Avaliação do Consumo Energético

Para determinar os custos com energia é necessário determinar além da quantidade de lâmpadas e luminárias, a potência da instalação. Para isto o valor do “W/m<sup>2</sup>” é um parâmetro muito usado.

Inicialmente faz-se o calculo da potência instalada total, levando em conta todas as lâmpadas, reatores, ignitores e demais aparelhos instalados na iluminação (OSRAM DO BRASIL, 2012).

A densidade de potência é a relação da potência total instalada pela área total dos recintos. É dada pela equação 21:

$$D = \frac{P_t}{A} \quad (21)$$

A comparação entre projetos luminotécnicos só é valida quando os níveis de iluminância são iguais para diferentes sistemas de iluminação. Portanto se torna importante conhecer a densidade de potencia relativa, que leva em conta a iluminância (OSRAM DO BRASIL, 2012). Nela encontra-se a densidade de potencia total para cada 100 lx e é dada pela equação 22.

$$D_r = \frac{D \cdot 100}{E} \quad (22)$$

#### 2.1.6.9 Avaliação de Custos

O projeto luminotécnico só estará completo com o cálculo dos custos de investimento e operacionais; e, por fim, com o cálculo de rentabilidade.

O custo de investimento é o somatório dos custos de aquisição de todos os equipamentos do qual o sistema de iluminação é composto juntamente com os custos com mão-de-obra dos profissionais.

Os custos operacionais são a soma de todos os custos posteriores a instalação do sistema de iluminação, tais como: manutenção das condições luminotécnicas de projeto e custos com energia demandada. O custo mensal de manutenção leva em conta a compra de novas lâmpadas, bem como o custo da mão de obra para a execução da manutenção. É resultado da soma das horas de utilização da lâmpada pela sua vida útil, assim resultando em um número de lâmpadas que serão repostas e esse valor deve ser multiplicado pelo preço de cada lâmpada nova. Enquanto que o custo da mão de obra é dado pelo preço da hora de trabalho do profissional. No entanto um fator de grande importância no custo operacional é o custo da energia elétrica demandada pelo sistema de iluminação escolhido.

Para analisar comparativamente qual sistema luminotécnico é mais rentável, deve-se levar em conta ambos os custos operacionais e de investimento. Geralmente, quando opta por lâmpadas de melhor eficiência energética o custo de investimento é superior, no entanto proporciona uma economia nos custos operacionais. Desta forma há uma amortização dos custos dentro de um período de tempo (OSRAM DO BRASIL, 2012).

## 2.6 LÂMPADAS FLUORESCENTES

As lâmpadas fluorescentes são basicamente compostas por um tubo de vidro selado revestido internamente com materiais fluorescentes conhecidos por cristais de fósforo, em seu interior é encontrado gás argônio e vapor de mercúrio à baixa pressão. Nas extremidades do tubo existem eletrodos metálicos de tungstênio revestidos (LUZ, 2012).

### 2.6.1 Funcionamento

Ao ser energizada a lâmpada, inicia-se um fluxo de elétrons entre os eletrodos criando um fluxo de corrente entre os eles denominado de arco elétrico ou descarga elétrica. Em seu deslocamento, os elétrons se chocam com os átomos de argônio liberando mais elétrons que ao se chocarem com os átomos de vapor de mercúrio provocam a emissão de radiação ultravioleta (TRIPOD, 2012).

Ao entrar em contato com o revestimento de cristais de fósforo do tubo, ocorre a fluorescência, provocando a emissão de radiação eletromagnética visível (LUZ, 2012).

O funcionamento das lâmpadas fluorescentes está vinculado com dois outros equipamentos: o *starter* e o reator.

O *starter* é um elemento bimetálico que tem como função pré-aquecer os eletrodos das lâmpadas e, em conjunto com o reator eletromagnético, fornecer um pulso de alta tensão necessário para o acendimento da lâmpada (FERREIRA, 2010).

Ao energizar o circuito da lâmpada ele abre e fecha, criando de alta tensão em alta frequência que dão início ao processo de ionização do gás dentro do tubo da lâmpada (NETTO, 2012). Após a lâmpada entrar em funcionamento, o *starter* fica inoperante, por sua tensão final ser insuficiente para gerar uma nova descarga (LUZ, 2012).

Outro componente é o reator, existem dois tipos de reatores: os reatores eletromagnéticos e os eletrônicos.

Os reatores eletromagnéticos são basicamente indutores ligados em série com a alimentação da lâmpada, e durante a ignição desta, provocam um aumento de tensão nos seus terminais e estabilizam a corrente durante seu funcionamento.

Os reatores eletrônicos desempenham a mesma função dos eletromagnéticos, no entanto funcionam a partir de um circuito de retificação e um oscilador, que pode ter frequências de 16 a 50 kHz (LUZ, 2012).

O fato de reatores eletromagnéticos serem indutores os faz demandar potencia reativa da rede e assim apresentar baixo fator de potencia, além de causarem interferência em equipamentos eletrônicos sensíveis como rádios e televisores. Para resolver este problema é geralmente ligado um capacitor em paralelo ao *starter*.

Os reatores eletrônicos possuem vantagens em relação aos eletromagnéticos ao ponto que possuem menos ruído audível, menor aquecimento, menor interferência magnética, menor consumo de energia elétrica e redução da cintilação (*flicker*). Havendo ainda reatores eletrônicos que permitem a dimerização das lâmpadas fluorescentes (LUZ, 2012).

## 2.6.2 Tipos de lâmpadas fluorescentes

O tipo mais tradicional de lâmpada fluorescente são as tubulares. São muito utilizadas em hospitais, bancos, escolas, lojas, entre muitos outros locais. Podem ser encontradas com potências de 15 a 110 W, diferentes tonalidades de cor e apresentam IRC de 85 % (Série 80).

As lâmpadas fluorescentes compactas integradas foram desenvolvidas para substituir as lâmpadas incandescentes comuns. Economizam até 80 % de energia elétrica a mais de energia que as incandescentes, possuem uma vida útil de aproximadamente 10.000 horas, apresentam um índice de reprodução de cores (IRC) de aproximadamente 80 %, são adaptáveis a base comum (E-27) e são encontradas em potências de 9 a 30 W.

Outro tipo de lâmpada que pode substituir as lâmpadas incandescentes em ambientes como cozinhas, áreas de serviço, entre outros, por possuir adaptador para a base comum, são as fluorescentes circulares.

As lâmpadas fluorescentes compactas não integradas são lâmpadas de 2 pinos, formadas pelo reator acoplado e um grupo de tubos revestidos de fósforos tricromáticos ligados de uma forma que possua dimensões reduzidas. Possuem um IRC de 82 % e são normalmente usadas de forma embutida, sendo bastante usadas na iluminação comercial e residencial (LUZ, 2012).

### 2.6.3 Descarte de lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes são uma ótima forma de economizar energia. No entanto, contém metais pesados como o mercúrio, que é tóxico nocivo ao ser humano e danoso a natureza (BERNARDES, 2012). Quando ocorre o rompimento do tubo, o vapor de mercúrio que possuem é liberado e absorvido principalmente pelos pulmões, causando intoxicação. Este vapor pode ficar no ar até três semanas dependendo da temperatura do ambiente (GRACIELA, 2012). Desta forma, o seu descarte não pode ser feito da maneira convencional, devem ser destinadas a uma reciclagem apropriada, sendo assim separadas do lixo reciclável comum e do orgânico (OSRAM DO BRASIL, 2012). Se este tipo de lâmpada for jogado em aterros, o mercúrio poderá infiltrar no solo chegando a lençóis freáticos e contaminando a água (GRACIELA, 2012).

Seu correto descarte deve ser feito de forma que não sejam quebradas, e devem ter como destino a reciclagem.

No processo de reciclagem as lâmpadas são inicialmente separadas por tamanho e então encaminhadas para a descontaminação que ocorre dentro de equipamentos onde é enclausurada e onde será feito o corte e a limpeza das lâmpadas por meio de pressão negativa, para que o vapor de mercúrio não se perca. Por meio de exaustão forçada o mercúrio é capturado em filtros de carvão ativado, bem como pó do revestimento interno de fosfato que também passa em filtros onde

as partículas ficam retidas para que então o ar chegue limpo a atmosfera. Por fim, o tubo de vidro após essa descontaminação é recolhido (COSTA, 2007).

## 2.7 A TECNOLOGIA LED

### 2.7.1 História

O LED (do inglês "*Light Emitting Diode*" – Diodo Emissor de Luz) é um componente eletrônico semicondutor que, quando aplicada uma tensão em seus terminais, é capaz de transformar energia elétrica em luminosa visível, este efeito recebe o nome de eletroluminescência (PERLUZ, 2012).

No ano de 1907, Henry Joseph Round quando pesquisava ondas eletromagnéticas em radiocomunicação descobriu o efeito da eletroluminescência (CLARITEK, 2012).

O primeiro LED foi desenvolvido pelo engenheiro da empresa *General Electric* - Nick Holoniak Jr. no ano de 1962, sendo este apenas da cor vermelha, baseado em Alumínio, Gálio e Fosforeto (AlGaP) (CLARITEK, 2012). Somente alguns anos depois puderam ser desenvolvidos os LEDs nas cores verde e amarela. Os primeiros LEDs eram usados como luzes indicadoras em diversos dispositivos (SOLELUX, 2012).

O LED de cor azul só foi desenvolvido alguns anos depois, mais exatamente no ano de 1995, pelo Engenheiro Eletrônico Shuji Nakamura, na *Nichia Comporations* do Japão e, somente devido esta tecnologia pôde ser obtida a cor branca, que também foi desenvolvida pelo mesmo Nakamura, luz esta, que pôde ser observada pela combinação das cores vermelha, verde e azul – RGB ("*Red, Green and Blue*"), utilizando novos materiais para a matriz do chip combinadas com as tecnologias já existentes na época. A combinação destas mesmas cores faz com que possamos obter diversas outras cores por meio de diferentes intensidades de cada uma das três cores.

Por meio de mais pesquisas, Nakamura ainda desenvolveu outro método de obter o LED na cor branca. Nesse método combinava-se um LED da cor azul,

produzido com Nitreto de Gálio (GaN), com uma cobertura composta por uma camada de fósforo capaz de radiar luz branca quando lhe é incidida uma luz pertencente ao espectro azul (LEDSLIFE, 2012).

Com isto, a aplicabilidade da tecnologia LED foi enormemente aumentada, deixando de ser usado apenas na sinalização de aparelhos eletrônicos, para ser ter aplicação mais vasta. Com as novas gerações de LEDs, os chamados “*High Power LEDs*”, ou LEDs de Alta Potência, esses puderam ser inseridos na iluminação em diversos segmentos, assim substituindo as lâmpadas tradicionais.

Os LEDs passaram por diferentes tecnologias e gerações, mas apenas a 6ª geração foi desenvolvida tendo como foco a iluminação e ainda existe uma grande evolução e novas tecnologias, os tornando cada vez mais eficientes (SOLELUX, 2012).

### 2.7.2 Conceitos Básicos

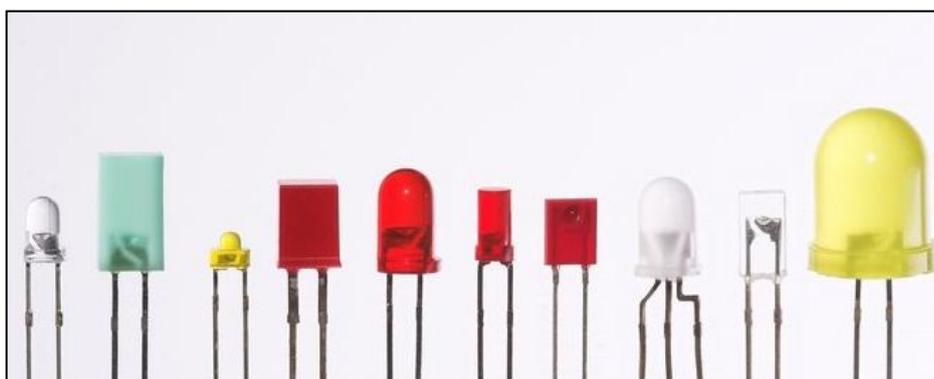
Conforme já descrito anteriormente, um LED é um componente semicondutor que emite luz, ao ser aplicada uma tensão em seus terminais de maneira adequada. Isto é algo muito diferente do que se tem de tecnologias de iluminação atualmente.

As lâmpadas LED são formadas por esses componentes, chamados então de matrizes (traduzido da palavra em inglês *dies*), que são montados em uma estrutura que os sustenta e protege, assim como as conexões elétricas, estrutura essa chamada de pacote (traduzido da palavra em inglês *package*). O número de fileiras de LED por pacote depende do tipo de pacote, assim como das características que se deseja. Desta forma, os diferentes pacotes têm características positivas e negativas que influenciam no tipo de aplicação adequado para cada um (HALCO LIGHTING TECHNOLOGIES, 2010).

Outra característica é que eles precisam de uma tensão muito baixa (3V – 4V) e necessitam de uma boa regulagem de tensão e corrente. Muitos produtos com LED já são feitos com controladores integrados e transformadores, já adequados à aplicação a que se destina, e estes têm como objetivo dar uma longa vida útil ao

produto assim como manter seguros os componentes internos. Os produtos projetados para operar em uma tensão de 120 V, aceitam uma longa faixa de tensões de entrada sem alteração na luminosidade emitida, mas este fato faz com que eles não sejam dimerizáveis (do inglês “*dimnable*”), ou seja, possuam regulagem de intensidade luminosa. Os produtos para baixa tensão são projetados para tensões de 12 V em corrente contínua e podem operar em 90 % das aplicações em 12 V em corrente alternada. Alguns dispositivos eletrônicos operam lâmpadas em 12 V em corrente alternada com transformadores eletrônicos, e isto pode ocasionar problemas aos produtos de LED devido à incompatibilidade ligada a diferença na frequência, assim acarretando seu mal ou nenhum funcionamento (HALCO LIGHTING TECHNOLOGIES, 2010).

### 2.7.3 LEDs de Baixa Potência



**Figura 40 - Diferentes exemplos de LEDs de baixa potência.**  
Fonte: Burgos eletrônica (2012).

Esta categoria de LEDs pode ser dividida em dois grupos, cada qual com suas características, formas distintas, tamanhos e níveis de potência (Figura 40). São denominados de baixa potência devido sua baixa corrente, que se restringe a dezenas de miliampères, enquanto que os LEDs de alta potência podem chegar a centenas de miliampères, e conseqüentemente a sua emissão de luz também acaba sendo menor. No entanto, este fato faz com que possuam aplicações diferenciadas.

Os LEDs mais comuns são encontrados geralmente como luzes indicadoras em aparelhos eletrônicos dos mais variados tipos (televisões, aparelhos de som,

entre outros) ou em aplicações onde não exista a necessidade de luz intensa, como *backlight* de chaves e botões.

Os LEDs do tipo SMD possuem características mais próximas dos LEDs de alta potência. Eles consistem em um ou mais matrizes de LED, ainda de baixa potência, em um único pacote, geralmente achatado. Este sendo cerâmico ou um refletor plástico, encapsulado em uma substância protetora e inserido em uma placa de circuito impresso. Operam com uma temperatura menor e, portanto, tem sua vida útil e brilho prolongados em relação aos LEDs comuns, sendo assim mais adequados ao uso em iluminação. Esses LEDs, quando agrupados em conjunto, podem ser uma ótima alternativa para iluminação, pois, mesmo sendo mais caros que os LEDs comuns, são muito mais baratos que os LEDs de alta potência (HALCO LIGHTING TECHNOLOGIES, 2010).

#### 2.7.4 LEDs de Alta Potência



**Figura 41 - Exemplo de LED de Alta Potência (1 W) com Dissipador Hexagonal de Alumínio.**

**Fonte: Ledslife (2012).**

Os LEDs de alta potência são sempre do tipo SMD “*surface-mount form factor*”, isto significa que o pacote é instalado diretamente na superfície da placa (Figura 41) e eles podem possuir somente uma única matriz como também múltiplas

matrizes em um único pacote. O nome dado a esses LEDs é devido sua capacidade de corrente de centenas de miliampères por matriz e como resultado temos uma emissão muito maior de luz, um maior brilho. Contudo, este fato faz com que os LEDs de alta potência gerem uma quantidade de calor muito superior ao gerado pelos de baixa potência, fazendo com que o calor gerado se torne um problema. Daí a exigência de sua montagem em superfície, que possui uma melhor dissipação do calor, e também, nos produtos com este tipo de LED, pode ser observado com frequência a existência de dissipadores de calor, geralmente de alumínio, para auxiliar na transferência deste calor ao ambiente.

Os LEDs de alta potência são muito caros quando comparados aos de baixa potência, isto se deve a necessidade de materiais semicondutores em maior quantidade e de melhor qualidade, além de um processo de fabricação mais sofisticado, isto para que possam operar de maneira satisfatória quando submetidos a correntes elevadas. Apesar disso, os LEDs de alta potência têm grande potencial para serem os substitutos dos tipos menos eficientes de iluminação em geral e também as especializadas (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010).

#### 2.7.5 Análise Térmica

Os LEDs, conforme a temperatura de cor, eles emitem uma luz fria, não apresentam irradiação de infravermelho em seu feixe luminoso, assim não irradiando calor. No entanto, eles apresentam potência dissipada em forma de calor que pode ser facilmente descartada por meio de dissipadores térmicos, desta forma, também aumentando sua vida útil (SOLELUX, 2012).

Os produtos LED vêm geralmente com avisos informando para não usá-los em luminárias completamente fechadas, isto significa que a lâmpada LED não pode ser colocada em uma luminária onde não haja circulação de ar. A razão pela qual isto ocorre remonta a gestão térmica, pois eles geram calor, mesmo sendo menos em relação a outras lâmpadas, e mesmo havendo dissipadores de calor ou invólucros de alumínio, não acontece uma troca de calor adequada sem um fluxo de

ar. Desta forma, a vida útil dos componentes dos quais a lâmpada é constituída é reduzida (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010).

#### 2.7.6 Economia

A eficiência do LED é muito alta, sendo que converte mais que 80% da energia necessária para sua alimentação em energia luminosa. A economia com seu uso pode chegar a 95 % da potência antes consumida. No entanto, devido seu alto custo inicial (as lâmpadas LED ainda são muito mais caras que as incandescentes e fluorescentes), para uma vantajosa troca das lâmpadas convencionais pelas LED deve ser previamente feita uma minuciosa análise da viabilidade econômica para que o investimento se pague o mais rápido possível e, portanto, quanto maior o tempo que esta lâmpada necessite ficar ligada, mais rápido será este retorno deste investimento (SOLELUX, 2012).

#### 2.7.7 Consumo

Segundo a Solelux (2012), empresa especializada em LED, tem-se que:

- A economia da troca de uma lâmpada incandescente de 60 W por uma equivalente a LED de 4,5 W seria de 55,5W/h;
- A economia da troca de uma lâmpada fluorescente tubular de 40 W por uma luminária equivalente a LED de 12 W seria de 28 W/h e;
- A troca de uma lâmpada dicróica de 50 W por uma luminária equivalente a LED de 3 W traria uma economia de 47 W/h.

Segundo a empresa Halco Lighting Technologies (2010), uma de suas mais potentes lâmpadas LED, a PAR30 consome apenas 14 W distribuídos em 12 pacotes de LED que produzem até 1080 lumens. Isto implica em uma grande economia quando se compara a uma PAR30 halógena de 75 W de potencia ou uma

BR30 que produzem luminosidade igual ou inferior. Além de uma lâmpada LED durar mais do que 10 dessas lâmpadas.

#### 2.7.8 Vida Útil

A vida útil das lâmpadas LED são superiores as demais, além de sua estrutura ser muito mais resistente à impactos, a impedindo de quebrar como as incandescentes e fluorescentes, feitas a partir de matérias como o vidro (SOLELUX, 2012). No entanto, prever a vida útil das lâmpadas LED depende de muitos fatores, mas as lâmpadas LED de boa qualidade são produzidas para durarem cerca de 50.000 horas (LED NEWS, 2011).

Segundo dados da Solelux (2012), a sétima geração dos LED tem como vida útil mais de 70.000 horas, enquanto que fluorescentes compactas têm 1.000 horas, fluorescentes tubulares têm 10.000 horas e dicróicas possuem vida útil estimada em 3.000 horas.

A Philips do Brasil (2010), ao lançar um modelo de lâmpada LED indicada para o uso residencial, afirma que chega a durar 25 vezes mais que uma lâmpada incandescente equivalente. Estimando uma vida útil de 25.000 horas com luz uniforme (PHILIPS, 2010). Em catálogo afirma ainda que as lâmpadas MASTER LED, possuem até 45.000 horas de vida útil (PHILIPS, 2010).

#### 2.7.9 Descarte e Sustentabilidade

O fato das lâmpadas LED não possuírem vidro, como as ProLED fabricadas pela Halco Lighting Technologies, produzirem pouco calor, quando comparadas as halógenas, e também não possuírem mercúrio como as lâmpadas fluorescentes, as torna seguras para a iluminação dos ambientes, de trabalho por exemplo, bem como são ambientalmente corretas, não possuindo elementos que contaminem o ambiente (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010). Devido esses fatos o descarte dos

LEDs pode ser feito sem a necessidade de um descarte especial, desta forma, se tornando mais barato (SOLELUX, 2012).

Conforme Daniel Serrano (2009), o trabalho de recolhimento e tratamento realizado para a reciclagem das lâmpadas convencionais (incandescentes e fluorescentes) é perigoso, além de ser prejudicial à natureza, devido principalmente a existência destas substâncias tóxicas nas lâmpadas fluorescentes.

#### 2.7.10 Qualidade de Luz

Como já foi comentado, não existem LEDs verdadeiramente brancos comercialmente viáveis. O que existe na verdade, são matérias que produzem luz em várias cores como o vermelho, o verde, o amarelo, o azul, e também, infravermelho e ultravioleta.

Há dois meios de se obter uma luz branca: por meio da associação de vários chips de cores diferentes e misturar sua luz (RGB), ou então, com o uso de uma camada de fósforo e uma única luz do espectro azul, geralmente um LED azul.

O método RGB é menos eficiente principalmente em configurações de alto desempenho, mas, por meio de um uso minucioso dos controles de intensidade de cada uma de suas matrizes luminosas, podemos produzir uma vasta gama de cores.

O método da camada de fósforo é atualmente muito mais eficiente. Contudo este processo também possui limitações no que trata da temperatura e cromaticidade. A composição e espessura do revestimento de fósforo afeta a temperatura de cor, reprodução das cores e saída de luz, além do fósforo possuir uma 'curva de resposta'. Isto significa que a exatidão do comprimento de onda do LED azul tem direto impacto na luz final. Assim, uma camada mais espessa de fósforo resulta em uma luz com temperatura de cor final mais quente e uma mais fina, conseqüentemente, resulta em uma temperatura de cor final mais fria. Há também empresas que adicionam fósforo vermelho a fim de melhorar a qualidade e reprodução de cor. Esses acréscimos da espessura do fósforo e adição de outros fósforos como o vermelho, resultam em perdas e fazem com que esse método não

seja totalmente eficiente e podendo haver maior geração de calor e, portanto acréscimo nas perdas térmicas.

Os fabricantes separam as lâmpadas em modelos que possuem características semelhantes, desta forma possuindo temperatura de cor e desempenho muito parecidos (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010).

Os LEDs, por não emitirem raios infravermelhos, bem como ultravioletas, acabam sendo adequados para o uso em exposições, pois, devido a ausência dessas radiações, não queimam nem desbotam as peças expostas (SOLELUX, 2012).

Uma vantagem da lâmpada LED, é que seu espectro de luz branca é mais suave que de uma lâmpada fluorescente compacta, desta forma abrangendo uma vasta gama do espectro, além de possuir uma luz de alta qualidade. Uma lâmpada LED atende a seu brilho total instantaneamente não sendo afetado pela comutação da chave (interruptor), além de não possuir mercúrio em sua composição. As lâmpadas LED que utilizam a tecnologia RGB, são capazes de apresentar efeitos de bruscas mudanças de cor. Em comparação com as lâmpadas halógenas, é notável sua significativa poupança de energia elétrica e a emissão de um feixe isento de calor e radiação ultravioleta tornando-as seguras para aplicações onde existe a preocupação com o aquecimento e desbotamento do objeto iluminado (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010).

#### 2.7.11 Direção da Luz

A emissão de luz das lâmpadas a LED, ao contrário das lâmpadas incandescentes, fluorescentes e também das lâmpadas HID, é unidirecional, ou seja, a lâmpada LED não irradia sua luz em todas as direções uniformemente.

Na melhor das teorias, um LED pode projetar em apenas um hemisfério. Isto se deve pela dificuldade de se transmitir a luz através de uma placa de circuito impresso e de um dissipador de calor, partes indispensáveis para um bom LED, sendo que a luz é emitida do topo da matriz (chip). Na verdade, o LED mais nu pode projetar luz em um cone de que vai de cerca de 120° a 140°. Existem experimentos

em estudo que utilizam substratos transparentes que tornam a distribuição luminosa mais ampla, no entanto, ainda não estão no mercado, e quando estiverem ainda sim apresentarão os mesmos empecilhos da placa de circuito impresso e do dissipador (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010).

Existem ainda métodos secundários para se obter padrões diferentes de iluminação, fora a direcional, a partir da luz dos LEDs. Esses métodos usufruem de lentes, embora também existam refletores, que se ligam ao pacote de LED de forma mecânica. No entanto a colocação desses acessórios afeta a eficiência original fazendo com que a quantidade de luz projetada seja menor que a gerada (HALCO LIGHTNING TECHNOLOGIES, 2010). Atualmente, existem lâmpadas LED que possuem estas lentes difusoras de luz que a espalham em várias direções e possuem base padrão que se encaixam nas luminárias comuns domésticas (YOMACAMA, 2012).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 A RESIDÊNCIA EM ESTUDO

Como ambiente de estudo deste projeto foi usada uma residência em processo de construção (Figura 42) que se encontra na região metropolitana de Curitiba, na cidade de Piraquara.



**Figura 42 - Visão frontal da residência em construção.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A residência possui dois pavimentos úteis (térreo e superior) sendo constituída dos seguintes cômodos no pavimento térreo: sala de estar, sala de jantar, cozinha, lavanderia, banheiro, circulação, escritório, garagem e as projeções das sacadas do pavimento superior; e no pavimento superior: 4 quartos, estar íntimo, circulação, banheiro, sacada frontal, sacada dos fundos e escada.

O processo de construção da residência se encontra na fase de instalação hidráulica e elétrica para, posteriormente, ocorrer o reboco, o calfinamento e os demais acabamentos. Com isto, já existe uma estrutura definida para a instalação elétrica (eletrodutos, pontos de luz, localização das tomadas e interruptores, entre

outras partes da estrutura) que foi projetada antes do início das obras. Assim, visando a coerência deste trabalho com a realidade, foi procurado respeitar as definições estruturais já estabelecidas, em especial a quantidade de pontos de luz e os eletrodutos.

Para uma melhor compreensão da previsão de carga de iluminação e da quantidade de pontos de luz que foi projetada para cada cômodo, cabe o entendimento dos critérios que foram usados na etapa do projeto elétrico da residência, com destaque para a iluminação.

A previsão de carga original da residência (com projeto arquitetônico de Maio de 1999) foi realizada conforme subitem 4.2.1.2 – Previsão de carga – da norma NBR 5410:1997, onde são prescritas as previsões de cargas de diferentes tipos de cargas: geral; iluminação; tomadas de uso geral; e tomadas de uso específico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). No subitem 4.2.1.2.2 – Iluminação – da NBR 5410:1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) são encontrados os seguintes tópicos:

- a) as cargas de iluminação devem ser determinadas como resultado da aplicação da NBR 5413;
- b) para os aparelhos fixos de iluminação a descarga, a potência nominal a ser considerada deverá incluir a potência das lâmpadas, as perdas e o fator de potência dos equipamentos auxiliares;
- c) em cada cômodo ou dependência de unidades residenciais e nas acomodações de hotéis, motéis e similares deve ser previsto pelo menos um ponto de luz fixo no teto, com potência mínima de 100 VA, comandado por interruptor de parede;

NOTA - Nas acomodações de hotéis, motéis e similares pode-se substituir o ponto de luz fixo no teto por tomada decorrente, com potência mínima de 100 VA, comandada por interruptor de parede.

- d) em unidades residenciais, como alternativa, para a determinação das cargas de iluminação, pode ser adotado o seguinte critério:
  - em cômodos ou dependências com área igual ou inferior a 6 m<sup>2</sup> deve ser prevista uma carga mínima de 100 VA;
  - em cômodo ou dependências com área superior a 6 m<sup>2</sup> deve ser prevista uma carga mínima de 100 VA para os primeiros 6 m<sup>2</sup>, acrescida de 60 VA para cada aumento de 4 m<sup>2</sup> inteiros.

NOTA - Os valores apurados correspondem à potência destinada a iluminação para efeito de dimensionamento dos circuitos, e não necessariamente à potência nominal das lâmpadas.

Por se tratar de uma residência, as cargas de iluminação puderam ser obtidas por meio do critério apresentado no tópico d) descrito acima. A quantidade de pontos de luz no teto foi determinada segundo o tópico c), onde é prevista a quantidade mínima de um ponto de luz no teto com potência mínima de 100 VA, bem como o bom senso em relação a adequada distribuição da luz no ambiente. Desta forma, temos conhecimento dos critérios usados para a elaboração da Tabela 2:

Tabela 2 - Previsão de carga dos circuitos de iluminação e quantidade de pontos de luz originalmente projetados.

Cômodos	Área [m <sup>2</sup> ]	Carga de iluminação [VA]	Quantidade de pontos de luz
<b>Pavimento térreo</b>			
Sala de Jantar	12,19	160	1
Sala de Estar	12,19	160	4
Cozinha	9,88	100	1
Circulação	2,85	100	1
Banheiro	3,37	100	1
Lavanderia	8,71	100	1
Escritório	12,44	160	3
Garagem	19,64	280	2
Proj. Sacada Frontal	5,32	100	1
Proj. Sacada Fundos	5,44	100	1
<b>Pavimento superior</b>			
Quarto 1	12,48	160	1
Quarto 2	11,27	160	1
Quarto 3	9,20	100	1
Estar Intimo	13,51	160	2
Circulação	3,20	100	1
Banheiro	5,72	100	1
Quarto Casal	19,64	280	2
Sacada Frontal	8,62	100	2
Sacada Fundos	5,44	100	1
Escada	2,96	100	1

**Fonte: Aatoria própria.**

No entanto, como descreve a nota ao fim do tópico d) do item 4.2.1.2.2 da NBR 5410:1997 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) transcrito anteriormente, os valores obtidos pelo uso do critério deste tópico,

apresentados na Tabela 2, são destinados para o dimensionamento dos circuitos de iluminação, não sendo necessariamente o valor de potência nominal das lâmpadas que serão usadas neste cômodo.

Desta forma, como o interesse deste trabalho esteve na comparação dos sistemas de iluminação, foi necessário o conhecimento da verdadeira potência nominal das lâmpadas usadas, não sendo usados os valores de carga descrita na Tabela 2. Portanto, as cargas de iluminação foram obtidas de acordo com o tópico a) do subitem 4.2.1.2.2 da NBR 5410:1997. Sendo assim, foi necessário um projeto luminotécnico que permitisse a obtenção dos valores das potências nominais das lâmpadas para cada cômodo e para cada sistema de iluminação, permitindo assim a comparação das lâmpadas fluorescentes e LED estudadas.

A comparação dos projetos para cada sistema de iluminação se deu por meio de parâmetros luminotécnicos genéricos, que independem da tecnologia de iluminação utilizada (incandescente, fluorescente, LED, etc.), assim possibilitando uma maior igualdade de parâmetros entre as tecnologias fluorescente e LED estudadas. Dentre os parâmetros pertinentes a iluminação residencial, destaca-se com maior importância, o fluxo luminoso, em lumens, necessário para cada cômodo. O fluxo luminoso está diretamente ligado com a iluminância, em lux, necessária no cômodo, obtida por meio da norma NBR 5413 – Iluminância de interiores. Além do fluxo luminoso, existem outros parâmetros não normatizados, mas ainda sim de grande importância na iluminação residencial, relacionados com a sensação de bem estar e a percepção das cores, que foram considerados na comparação das lâmpadas, são eles: a temperatura de cor e o índice de reprodução de cores (IRC).

### 3.2 O PROJETO LUMINOTÉCNICO TEÓRICO DA RESIDÊNCIA

O projeto luminotécnico da residência teve como base a etapa em que se encontra atualmente a construção, onde já estão definidos os pontos de luz para cada cômodo conforme a Tabela 2. Sendo assim evitada a redistribuição dos pontos de luz nos cômodos.

O método utilizado no projeto luminotécnico foi o Método dos Lumens (ou Método das Eficiências) e teve como referência a metodologia apresentada no Manual Luminotécnico Prático da OSRAM (OSRAM DO BRASIL, 2012). Sendo que os valores de iluminância necessária para os cômodos foram levantados por meio da norma NBR 5413 – Iluminância de interiores.

### 3.2.1 Características dos cômodos

Os materiais e cores usados nos cômodos foram estipulados dentro dos fornecidos no ANEXO A. Assim se obteve os coeficientes de reflexão para o teto, parede e piso de cada cômodo da residência dispostos na Tabela 3 para os cômodos do pavimento térreo e na Tabela 4 para os cômodos do pavimento superior

Tabela 3 - Coeficientes de reflexão - Pavimento térreo.

Cômodos	Pavimento térreo					
	Material/cor			Coeficiente de reflexão		
	Teto	Paredes	Piso	Teto	Paredes	Piso
Sala de Jantar	Gesso	Creme claro	Marrom claro	0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Sala de Estar	Gesso	Creme claro	Marrom claro	0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Cozinha	Branco	Azulejos brancos	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75	0,6 - 0,75
Circulação	Branco	Creme claro	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Banheiro	Branco	Azulejos brancos	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75	0,6 - 0,75
Lavanderia	Branco	Azulejos brancos	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75	0,6 - 0,75
Escritório	Gesso	Branco	Marrom claro	0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Garagem	Branco	Creme claro	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75
Proj. Sacada Frontal	Branco	Creme claro	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75
Proj. Sacada Fundos	Branco	Creme claro	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Coeficientes de reflexão - Pavimento superior.

Cômodos	Pavimento superior					
	Material/cor			Coeficiente de reflexão		
	Teto	Paredes	Piso	Teto	Paredes	Piso
Quarto 1	Branco	Branco	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Quarto 2	Branco	Creme claro	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Quarto 3	Branco	Branco	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Estar Intimo	Branco	Creme claro	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Circulação	Branco	Creme claro	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Banheiro	Branco	Azulejos brancos	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75	0,6 - 0,75
Quarto Casal	Branco	Branco	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35
Sacada Frontal	Branco	Creme claro	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75
Sacada Fundos	Branco	Creme claro	Azulejos brancos	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,6 - 0,75
Escada	Branco	Creme claro	Marrom claro	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,25 – 0,35

**Fonte: Autoria própria.**

Dentre o intervalo de valores para os coeficientes de reflexão, foram escolhidos os maiores valores para cada superfície dentre os mostrados na Tabela 3 e na Tabela 4.

Para dar prosseguimento ao projeto luminotécnico foi necessário o levantamento de outros fatores relativos aos cômodos.

O valor do índice do recinto (K) para cada cômodo foi obtido pela equação 16. Este fator tem influência das áreas do teto do ambiente e da área do plano de trabalho, as quais geralmente apresentam valores iguais, com exceção do cômodo “estar íntimo” que, devido à existência da escada, apresenta uma área do teto maior. Outro parâmetro necessário para a obtenção do índice do recinto foi a área de parede entre o plano de trabalho, situado a 0,8 m do piso de acordo com NBR 5382 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985), e o plano iluminante da luminária. Para a escada, como a iluminância neste cômodo é destinada aos degraus, o nível destes foi considerado como o plano de trabalho.

Como fator de depreciação foi usado o valor de 1,25 que corresponde a um ambiente com boa manutenção: limpeza das lâmpadas e luminárias e substituição programa das lâmpadas (KAWASAKI, 2013).

Para os valores dos coeficientes de reflexão, foram escolhidos os maiores valores dentre os mostrados na Tabela 3 e na Tabela 4.

As características dos cômodos relevantes ao prosseguimento do cálculo luminotécnico estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos cômodos

Cômodos	Índice do Recinto (K)	Fator de Depreciação (Fd)	Coeficiente de reflexão		
			Teto	Paredes	Piso
<b>Pavimento térreo</b>					
Sala de Jantar	0,916541	1,25	0,8	0,8	0,35
Sala de Estar	0,741259	1,25	0,8	0,8	0,35
Cozinha	0,866667	1,25	0,8	0,75	0,75
Circulação	0,377358	1,25	0,8	0,8	0,35
Banheiro	0,472982	1,25	0,8	0,75	0,75
Lavanderia	0,861097	1,25	0,8	0,75	0,75
Escritório	0,992223	1,25	0,8	0,8	0,35
Garagem	1,21657	1,25	0,8	0,8	0,75
Proj. Sacada Frontal	0,568376	1,25	0,8	0,8	0,75
Proj. Sacada Fundos	0,61678	1,25	0,8	0,8	0,75
<b>Pavimento superior</b>					
Quarto 1	1,037622	1,25	0,8	0,8	0,35
Quarto 2	0,996904	1,25	0,8	0,8	0,35
Quarto 3	0,901961	1,25	0,8	0,8	0,35
Estar Intimo	1,00695	1,25	0,8	0,8	0,35
Circulação	0,448179	1,25	0,8	0,8	0,35
Banheiro	0,70098	1,25	0,8	0,75	0,75
Quarto Casal	1,252351	1,25	0,8	0,8	0,35
Sacada Frontal	0,631849	1,25	0,8	0,8	0,75
Sacada Fundos	0,653061	1,25	0,8	0,8	0,75
Escada	0,36208	1,25	0,8	0,8	0,35

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Características da iluminação

A iluminância média necessária para cada cômodo foi obtida por meio da NBR 5413 – Iluminância de interiores.

No subitem 5.3.65 – residências - são estabelecidos os valores de iluminância média geral mínimos para cada cômodo de uma residência (ANEXO B). Por não constar no subitem 5.3.65 da norma, o valor de iluminância do escritório foi obtido no subitem 5.3.14 – escritórios - onde é apresentado o valor de iluminância para alguns tipos de escritórios. Dentre os tipos apresentados na norma, o que possui finalidade mais próxima ao escritório em questão é o “escritório de desenho e esboço” (ANEXO B).

Para a escolha dos valores de iluminância dentre os três valores apresentados para cada ambiente nos subitens 5.3.65 – residências - e 5.3.14 – escritórios - foram usados os critérios descritos no subitem 5.2.4.1 da norma NBR 5413 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), encontrados no ANEXO D.

Ao se tratar de uma residência convencional, os pareceres referentes à escolha do maior valor de iluminância não são habituais, geralmente: o trabalho visual não é crítico, não existe a necessidade de alta produtividade ou precisão, os erros não são de difícil correção. Portanto, foram usados apenas os valores do médio e menor de iluminância, considerando também a idade (20 a 55 anos) e condições de seus moradores (todos com plenas condições).

Os valores de iluminância para as varandas no pavimento superior e projeções das varandas no pavimento térreo, por não constarem no subitem 5.3 da norma NBR 5413, foram obtidos pelo subitem 5.1 – Iluminâncias por classe de tarefas visuais (ANEXO C). Foi escolhida a classe A – Iluminação geral para áreas usadas intermitentemente ou tarefas visuais simples – e o tipo de atividade “Orientação simples para permanência curta”.

A iluminância escolhida, dentre as três apresentadas por tipo de atividade no Quadro 1 do ANEXO B, foi determinada por três fatores que constam no Quadro 2 do ANEXO C.

O procedimento para determinar a iluminância adequada segue os critérios descritos no subitem 5.2.2 da norma NBR 5413 (ANEXO D):

Com estas informações construiu-se a Tabela 6.

Tabela 6 - Fatores determinantes da iluminâncias considerados para as varandas e projeções das varandas.

Características da tarefa e do observador		Peso considerado
Idade	0	40 a 55 anos
Velocidade e precisão	-1	Sem importância
Refletância do fundo da tarefa	0	30 a 70 %
<b>Soma</b>	<b>-1</b>	<b>Valor médio de iluminância – 75 lux</b>

Fonte: Autoria própria.

A temperatura de cor dos cômodos foi determinada tendo em vista o aspecto psicológico, visando o bem-estar dos moradores. Portanto, em cômodos como: quartos, salas de estar e jantar, estar íntimo, circulação, sacadas e projeções das sacadas; foi usada uma temperatura de cor de 2700 K. Em cômodos que se necessita de atenção, onde são realizadas tarefas, tais como: garagem, escritório, lavanderia e cozinha foi usada uma temperatura de cor de 4000 K. Nos banheiros foi usada uma temperatura de cor de 6500 K por além de requerer atenção também é desejável uma sensação de limpeza.

O índice de reprodução de cores (IRC) desejado para todos os cômodos foi superior a 80 %, para que exista uma boa fidelidade na reprodução das cores em todo o ambiente residencial.

Os valores de iluminância média necessária, temperatura de cor e índice de reprodução de cor por cômodo, constam na Tabela 7 e foram parâmetros procurados na iluminação e, conseqüentemente, serviram como critérios para a escolha das lâmpadas de ambas as tecnologias.

Tabela 7 - Características procuradas da iluminação.

<b>Cômodos</b>	<b>Iluminância média necessária [lx]</b>	<b>Temperatura de cor [K]</b>	<b>Índice de reprodução de cores (IRC)</b>
<b>Pavimento térreo</b>			
Sala de Jantar	150	2700	> 80
Sala de Estar	150	2700	> 80
Cozinha	150	4000	> 80
Circulação	100	2700	> 80
Banheiro	150	6500	> 80
Lavanderia	200	4000	> 80
Escritório	500	4000	> 80
Garagem	100	4000	> 80
Proj. Sacada Frontal	75	2700	> 80
Proj. Sacada Fundos	75	2700	> 80
<b>Pavimento superior</b>			
Quarto 1	100	2700	> 80
Quarto 2	150	2700	> 80
Quarto 3	100	2700	> 80
Estar Intimo	150	2700	> 80
Circulação	100	2700	> 80
Banheiro	150	6500	> 80
Quarto Casal	150	2700	> 80
Sacada Frontal	75	2700	> 80
Sacada Fundos	75	2700	> 80
Escada	100	2700	> 80

**Fonte: A autoria própria.**

### 3.2.3 Luminárias e lâmpadas

Foram usados dois tipos de luminárias neste projeto: a luminária Rubi, para duas lâmpadas fluorescentes compactas ou duas lâmpadas LED do tipo bulbo; e a luminária 3740, para duas lâmpadas fluorescentes tubulares ou duas lâmpadas LED tubulares; ambas fabricadas pela empresa Itaim. Ambas as luminárias não são completamente fechadas, tendo em vista as recomendações das lâmpadas LED, onde uma luminária fechada dificultaria a circulação de ar e acarretaria uma diminuição da vida útil da lâmpada.

A escolha da luminária levou em conta as características de cada cômodo, tais como: seu espaço físico, permitindo o uso de luminárias para lâmpadas

tubulares, e as atividades que nele são realizadas, que influenciam na temperatura de cor adequada, o que de forma indireta tem influência no tipo de luminária a ser escolhida (por exemplo, é incomum lâmpadas tubulares apresentarem temperatura de cor de 2700 K, o que as torna inadequadas para ambientes como quartos). Para os cálculos foi usado um único modelo de luminária para cada cômodo independentemente da tecnologia de iluminação empregada. Este critério foi usado, pois a comparação se deu entre as lâmpadas, não sendo intenção a comparação das luminárias, e o uso de luminárias diferentes para cada tecnologia influenciaria em fatores luminotécnicos importantes (curva de distribuição luminosa (CDL) e índice de eficiência da luminária que modificam o fator de utilização ( $F_u$ )) que resultariam em uma distorção do fluxo luminoso final necessário, portanto prejudicando a comparação entre as tecnologias abordadas.

A quantidade final de luminárias para cada cômodo teve como parâmetro básico a quantidade de pontos de luz dispostos nesses cômodos indicados na Tabela 2, bem como o fluxo luminoso necessário para cada cômodo.

O fator de utilização de cada luminária foi obtido por meio de catálogo da empresa Itaim. Os valores de fator de utilização são tabelados e podem ser vistos no ANEXO E. Contudo, os coeficientes de reflexão definidos nas tabelas do fator de utilização das luminárias não apresentam os mesmos valores encontrados na Tabela 5. Desta forma foram usados os valores dos coeficientes de reflexão das tabelados de utilização da empresa que mais se aproximam dos definidos na Tabela 5. Sendo assim, para todos os cômodos chegou-se aos valores de: 0,7 (70 % de reflexão) para o teto; 0,5 (50 % de reflexão) para as paredes e; 0,1 (10 % de reflexão) para o piso.

Para escolher o fator de utilização correto para cada cômodo separadamente, foi encontrado na tabela do fator de utilização da luminária (ANEXO E) um valor para o índice do recinto ( $K$ ) mais próximo ao calculado para o cômodo e então foi cruzado este valor com os valores de coeficiente de reflexão do teto, parede e piso obtidos para esse cômodo. Esses valores podem ser vistos na Tabela 8.

Com o conhecimento do fator de utilização usado em cada cômodo, por meio da equação 19 pudemos encontrar o valor do fluxo luminoso necessário nos cômodos apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Luminárias e fluxo luminoso necessário por cômodo.

Cômodos	Índice do recinto (K)	Coeficiente de reflexão			Tipo de luminária	Fator de utilização (Fu)	Fluxo luminoso necessário [lm]
		Teto	Paredes	Piso			
<b>Pavimento térreo</b>							
Sala de Jantar	0,916	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,50	4571,25
Sala de Estar	0,741	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,46	4968,75
Cozinha	0,867	0,7	0,5	0,1	3740	0,46	4027,174
Circulação	0,377	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	868,9024
Banheiro	0,473	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	1541,159
Lavanderia	0,861	0,7	0,5	0,1	3740	0,46	4733,696
Escritório	0,992	0,7	0,5	0,1	3740	0,52	14951,92
Garagem	1,216	0,7	0,5	0,1	3740	0,58	4232,759
Proj. Sacada Frontal	0,568	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	1216,463
Proj. Sacada Fundos	0,617	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	1243,902
<b>Pavimento superior</b>							
Quarto 1	1,037	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,50	3120
Quarto 2	0,997	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,50	4226,25
Quarto 3	0,902	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,50	2300
Estar Intimo	1,007	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,50	5066,25
Circulação	0,448	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	975,6098
Banheiro	0,701	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,46	2331,522
Quarto Casal	1,252	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,54	6819,444
Sacada Frontal	0,632	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	1971,037
Sacada Fundos	0,653	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	1243,902
Escada	0,362	0,7	0,5	0,1	Rubi	0,41	902,439

Fonte: A autoria própria.

Determinado o fluxo necessário para cada cômodo da residência pôde-se então escolher as lâmpadas mais adequadas de cada tecnologia.

Todas as lâmpadas escolhidas para o cálculo teórico foram da marca Philips. Para essa escolha foram considerados outros fatores além dos demonstrados na Tabela 7. Dentre esses fatores foram levados em consideração a credibilidade da marca e diversidade de produtos ofertados, bem como a disponibilidade de dados técnicos relevantes ao prosseguimento dos cálculos, tais como: fluxo luminoso, temperatura de cor, índice de reprodução de cor, vida mediana, reator adequado, entre outros fatores. Também foi considerado o fato de, por serem da mesma marca,

possivelmente terem sido submetidas aos mesmos testes, com os mesmo critérios, permitindo uma maior fidelidade na comparação teórica das lâmpadas, visto que não seria possível a implantação prática, e consequente análise, dos dois sistemas em sua totalidade na residência.

Outro fator relevante na escolha dos modelos usados para o cálculo foi a diversidade de modelos ofertados de cada tecnologia. Como a tecnologia LED na iluminação ainda é muito nova quando comparada a fluorescente, a quantidade de modelos de lâmpadas LED ofertada é muito menor, independente do fabricante. Assim, foram escolhidos os modelos de lâmpadas LED que apresentaram as melhores condições de comparação frente às lâmpadas fluorescentes. As especificações das lâmpadas usadas estão no ANEXO F.

Conhecidas as lâmpadas com especificações adequadas para cada cômodo, por meio do fluxo luminoso individual de cada uma, foi encontrada a quantidade de lâmpadas para que fosse suprido o fluxo luminoso necessário total de cada um dos cômodos pelo uso da equação 20. As lâmpadas escolhidas e suas especificações estão dispostas na Tabela 11 para as fluorescentes e na Tabela 14 para as LED.

Para a escolha dos reatores das lâmpadas fluorescentes tubulares, também da marca Philips, foi levado em conta principalmente o fator de potência, de maneira que este não implicasse de maneira significativa na potência final do conjunto lâmpada-reator. Os reatores escolhidos, suas especificações e quantidades por cômodo, estão dispostos na Tabela 12.

Por fim, calculou-se a potência de iluminação instalada, em Watts, para cada cômodo separadamente e foi determinada a densidade de potência, em Watt por metro quadrado, por meio da equação 21, e a densidade de potência relativa para cada cômodo, por meio da equação 22. Estes procedimentos foram realizados para cada sistema separadamente a fim de permitir sua comparação ao fim deste trabalho e estão na Tabela 13 para as lâmpadas fluorescentes e na Tabela 15 para as lâmpadas LED.

O projeto luminotécnico teórico completo da residência, está disposto nas seguintes tabelas: Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 9 - Projeto luminotécnico da residência - Características dos cômodos

Características dos cômodos											
Cômodos	Perímetro [m]	Pé-direito [m]	Pé-direito Útil [m]	Área do plano de trabalho (Apt) [m <sup>2</sup> ]	Área da parede (Ap) [m <sup>2</sup> ]	Área do teto (At) [m <sup>2</sup> ]	Índice do recinto (K)	Fator de depreciação (Fd)	Coeficiente de reflexão		
									Teto	Paredes	Piso
<b>Pavimento térreo</b>											
Sala de Jantar	14	2,70	1,90	12,19	26,60	12,19	0,916541	1,25	0,7	0,5	0,1
Sala de Estar	14,3	3,10	2,30	12,19	32,89	12,19	0,741259	1,25	0,7	0,5	0,1
Cozinha	12	2,70	1,90	9,88	22,80	9,88	0,866667	1,25	0,7	0,5	0,1
Circulação	7,95	2,70	1,90	2,85	15,11	2,85	0,377358	1,25	0,7	0,5	0,1
Banheiro	7,5	2,70	1,90	3,37	14,25	3,37	0,472982	1,25	0,7	0,5	0,1
Lavanderia	11,9	2,50	1,70	8,71	20,23	8,71	0,861097	1,25	0,7	0,5	0,1
Escritório	14,75	2,50	1,70	12,44	25,08	12,44	0,992223	1,25	0,7	0,5	0,1
Garagem	18,45	2,55	1,75	19,64	32,29	19,64	1,21657	1,25	0,7	0,5	0,1
Proj. Sacada Frontal	10,4	2,60	1,80	5,32	18,72	5,32	0,568376	1,25	0,7	0,5	0,1
Proj. Sacada Fundos	9,8	2,60	1,80	5,44	17,64	5,44	0,61678	1,25	0,7	0,5	0,1
<b>Total do pavimento</b>	-	-	-	92,44	-	-	-	-	-	-	-
<b>Pavimento superior</b>											
Quarto 1	14,15	2,50	1,70	12,48	24,06	12,48	1,037622	1,25	0,7	0,5	0,1
Quarto 2	13,3	2,50	1,70	11,27	22,61	11,27	0,996904	1,25	0,7	0,5	0,1
Quarto 3	12	2,50	1,70	9,20	20,40	9,20	0,901961	1,25	0,7	0,5	0,1
Estar Intimo	17,35	2,50	1,70	13,51	29,50	16,19	1,00695	1,25	0,7	0,5	0,1
Circulação	8,4	2,50	1,70	3,20	14,28	3,20	0,448179	1,25	0,7	0,5	0,1
Banheiro	9,6	2,50	1,70	5,72	16,32	5,72	0,70098	1,25	0,7	0,5	0,1
Quarto Casal	18,45	2,50	1,70	19,64	31,37	19,64	1,252351	1,25	0,7	0,5	0,1
Sacada Frontal	16,05	2,50	1,70	8,62	27,29	8,62	0,631849	1,25	0,7	0,5	0,1
Sacada Fundos	9,8	2,50	1,70	5,44	16,66	5,44	0,653061	1,25	0,7	0,5	0,1
Escada	8,5	2,50	2,50	2,96	16,35	2,96	0,36208	1,25	0,7	0,5	0,1
<b>Total do pavimento</b>	-	-	-	87,82	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Projeto luminotécnico da residência - Características da iluminação e luminárias

Cômodos	Características da iluminação				Luminárias				
	Iluminância média necessária [lx]	Temperatura de cor [K]	Índice de reprodução de cores (IRC)	Modelo da luminária	Eficiência da luminária ( $\eta_L$ )	Eficiência do recinto ( $\eta_r$ )	Fator de utilização (Fu)	Lâmpadas por luminária	Fluxo luminoso necessário [lm]
<b>Pavimento térreo</b>									
Sala de Jantar	150	2700	> 80	Rubi	-	-	0,50	2	4571,25
Sala de Estar	150	2700	> 80	Rubi	-	-	0,46	2	4968,75
Cozinha	150	4000	> 80	3740	-	-	0,46	2	4027,1739
Circulação	100	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	868,90244
Banheiro	150	6500	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	1541,1585
Lavanderia	200	4000	> 80	3740	-	-	0,46	2	4733,6957
Escritório	500	4000	> 80	3740	-	-	0,52	2	14951,923
Garagem	100	4000	> 80	3740	-	-	0,58	2	4232,7586
Proj. Sacada Frontal	75	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	1216,4634
Proj. Sacada Fundos	75	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	1243,9024
<b>Pavimento superior</b>									
Quarto 1	100	2700	> 80	Rubi	-	-	0,50	2	3120
Quarto 2	150	2700	> 80	Rubi	-	-	0,50	2	4226,25
Quarto 3	100	2700	> 80	Rubi	-	-	0,50	2	2300
Estar Intimo	150	2700	> 80	Rubi	-	-	0,50	2	5066,25
Circulação	100	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	975,60976
Banheiro	150	6500	> 80	Rubi	-	-	0,46	2	2331,5217
Quarto Casal	150	2700	> 80	Rubi	-	-	0,54	2	6819,4444
Sacada Frontal	75	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	1971,0366
Sacada Fundos	75	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	1243,9024
Escada	100	2700	> 80	Rubi	-	-	0,41	2	902,43902

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Projeto luminotécnico da residência – Especificações das lâmpadas fluorescentes escolhidas

Lâmpadas fluorescentes										
Cômodos	Modelo da lâmpada	Potência [W]	Tensão [V]	Fluxo luminoso [lm]	Eficiência luminosa [lm/W]	Temperatura de Cor [K]	Índice de Reprodução de Cores (IRC)	Vida mediana [horas]	Quant. calculada de lâmpadas	Quantidade final de lâmpadas
<b>Pavimento térreo</b>										
Sala de Jantar	PLWTWIST42W127B	42	110 - 127	2800	66	2700	82	8000	1,63259	2
Sala de Estar	PLEW14W127GENB	14	110 - 127	800	57	2700	82	8000	6,21094	8
Cozinha	TLDRS32W-S84-ECO	32	(1)	2700	84	4000	85	15000	1,49155	2
Circulação	PLEW11W127GENB	11	110 - 127	600	59	2700	82	8000	1,44817	2
Banheiro	PLEW18W127GENB	18	110 - 127	1080	60	6500	82	8000	1,42700	2
Lavanderia	TLDRS32W-S84-ECO	32	(1)	2700	84	4000	85	15000	1,75322	2
Escritório	TLDRS32W-S84-ECO	32	(1)	2700	84	4000	85	15000	5,53775	6
Garagem	TLDRS32W-S84-ECO	32	(1)	2700	84	4000	85	15000	1,56769	4
Proj. Sacada Frontal	PLEW14W127GENB	14	110 - 127	800	57	2700	82	8000	1,52058	2
Proj. Sacada Fundos	PLEW14W127GENB	14	110 - 127	800	57	2700	82	8000	1,55488	2
<b>Pavimento superior</b>										
Quarto 1	PLWTWIST27W127B	27	110 - 127	1750	65	2700	82	8000	1,78286	2
Quarto 2	PLWTWIST42W127B	42	110 - 127	2800	66	2700	82	8000	1,50938	2
Quarto 3	PLWTWIST27W127B	27	110 - 127	1750	65	2700	82	8000	1,31429	2
Estar Intimo	PLWTWIST23W127B	23	110 - 127	1550	67	2700	82	8000	3,26855	4
Circulação	PLEW11W127GENB	11	110 - 127	600	59	2700	82	8000	1,62602	2
Banheiro	PLDTWIST20W127B	20	110 - 127	1250	62	6500	80	8000	1,86522	2
Quarto Casal	PLWTWIST27W127B	27	110 - 127	1750	65	2700	82	8000	3,89683	4
Sacada Frontal	PLEW11W127GENB	11	110 - 127	600	59	2700	82	8000	3,28506	4
Sacada Fundos	PLEW14W127GENB	14	110 - 127	800	57	2700	82	8000	1,55488	2
Escada	PLEW11W127GENB	11	110 - 127	600	59	2700	82	8000	1,50407	2

**Fonte: Autoria própria.**

**Nota:** (1) as lâmpadas do modelo TLDRS32W-S84-ECO, por serem do tipo tubular, possuem reatores(Tabela 12).

Tabela 12 - Projeto luminotécnico da residência – Especificações dos reatores escolhidos

Cômodos	Reator eletrônico									
	Número	Modelo	Tipo de partida	Lâmpada	Tensão - Frequência	Potência total [W]	Fator de potência	Fator de fluxo luminoso	Quantidade de reatores	Potência Reator - lâmpada
Cozinha	50	EL232A16	Instantânea	2 x 32 W	127 V - 50/60 Hz	67	0,98	1	1	70,4
Lavanderia	50	EL232A16	Instantânea	2 x 32 W	127 V - 50/60 Hz	67	0,98	1	1	70,4
Escritório	50	EL232A16	Instantânea	2 x 32 W	127 V - 50/60 Hz	67	0,98	1	3	70,4
Garagem	50	EL232A16	Instantânea	2 x 32 W	127 V - 50/60 Hz	67	0,98	1	2	70,4

**Fonte: Autoria própria.**

Tabela 13 - Projeto luminotécnico da residência – Cálculo de controle e de consumo da instalação - Fluorescentes

Cômodos	Cálculo de controle			Consumo da instalação		
	Quantidade de luminárias na instalação	Fluxo luminoso alcançado [lm]	Iluminância alcançada [lx]	Potência instalada [W]	Densidade de potência [W/m <sup>2</sup> ]	Densidade de potência relativa [W/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]
<b>Pavimento térreo</b>						
Sala de Jantar	1	5600	183,76	84	6,89089	3,75000
Sala de Estar	4	6400	193,21	112	9,18786	4,75543
Cozinha	1	5400	201,13	70,4	7,12551	3,54267
Circulação	1	1200	138,11	22	7,71930	5,58943
Banheiro	1	2160	210,23	36	10,68249	5,08130
Lavanderia	1	5400	228,15	70,4	8,08266	3,54267
Escritório	3	16200	541,74	211,2	16,97749	3,13390
Garagem	2	10800	255,15	140,8	7,16904	2,80971
Proj. Sacada Frontal	1	1600	98,65	28	5,26316	5,33537
Proj. Sacada Fundos	1	1600	96,47	28	5,14706	5,33537
<b>Total do pavimento</b>	-	-	-	802,8	8,68455	-
<b>Pavimento superior</b>						
Quarto 1	1	3500	112,18	54	4,32692	3,85714
Quarto 2	1	5600	198,76	84	7,45342	3,75000
Quarto 3	1	3500	152,17	54	5,86957	3,85714
Estar Intimo	2	6200	183,57	92	6,80977	3,70968
Circulação	1	1200	123,00	22	6,87500	5,58943
Banheiro	1	2500	160,84	40	6,99301	4,34783
Quarto Casal	2	7000	153,97	108	5,49898	3,57143
Sacada Frontal	2	2400	91,32	44	5,10441	5,58943
Sacada Fundos	1	1600	96,47	28	5,14706	5,33537
Escada	1	1200	132,97	22	7,43243	5,58943
<b>Total do pavimento</b>	-	-	-	548	6,24004	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Projeto luminotécnico da residência – Especificações das lâmpadas LED escolhidas

Cômodos	Lâmpadas LED									
	Modelo da lâmpada	Potência [W]	Tensão [V]	Fluxo luminoso [lm]	Eficiência luminosa [lm/W]	Temperatura de Cor [K]	Índice de Reprodução de Cores (IRC)	Vida mediana [horas]	Quant. calculada de lâmpadas	Quantidade final de lâmpadas
<b>Pavimento térreo</b>										
Sala de Jantar	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	5,71406	6
Sala de Estar	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	6,21094	8
Cozinha	MASTER LEDtube GA	22	100 - 240	2100	95	4000	85	50000	1,91770	2
Circulação	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	1,08613	2
Banheiro	MASTER LED bulb	9	100 - 240	600	67	6500	75	45000	2,56860	4
Lavanderia	MASTER LEDtube GA	22	100 - 240	2100	95	4000	85	50000	2,25414	4
Escritório	MASTER LEDtube GA	22	100 - 240	2100	95	4000	85	50000	7,11996	8
Garagem	MASTER LEDtube GA	22	100 - 240	2100	95	4000	85	50000	2,01560	4
Proj. Sacada Frontal	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	1,52058	2
Proj. Sacada Fundos	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	1,55488	2
<b>Pavimento superior</b>										
Quarto 1	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	3,90000	4
Quarto 2	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	5,28281	6
Quarto 3	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	2,87500	4
Estar Intimo	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	6,33281	8
Circulação	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	1,21951	2
Banheiro	MASTER LED bulb	9	100 - 240	600	67	6500	75	45000	3,88587	4
Quarto Casal	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	8,52431	10
Sacada Frontal	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	2,46380	4
Sacada Fundos	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	1,55488	2
Escada	EnduraLED A19 Bulb	12,5	110 - 130	800	64	2700	80	25000	1,12805	2

Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 - Projeto luminotécnico da residência – Cálculo de controle e de consumo da instalação - LED

Cômodos	Cálculo de controle			Consumo da instalação		
	Quantidade de luminárias na instalação	Fluxo luminoso alcançado [lm]	Iluminância alcançada [lx]	Potência instalada [W]	Densidade de potência [W/m <sup>2</sup> ]	Densidade de potência relativa [W/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]
<b>Pavimento térreo</b>						
Sala de Jantar	3	4800	157,51	75	6,15258	3,90625
Sala de Estar	4	6400	193,21	100	8,20345	4,24592
Cozinha	1	4200	156,44	44	4,45344	2,84679
Circulação	1	1600	184,14	25	8,77193	4,76372
Banheiro	2	2400	233,59	36	10,68249	4,57317
Lavanderia	2	8400	354,90	88	10,10333	2,84679
Escritório	4	16800	561,80	176	14,14791	2,51832
Garagem	2	8400	198,45	88	4,48065	2,25780
Proj. Sacada Frontal	1	1600	98,65	25	4,69925	4,76372
Proj. Sacada Fundos	1	1600	96,47	25	4,59559	4,76372
<b>Total do pavimento</b>	-	-	-	682	7,37776	
<b>Pavimento superior</b>						
Quarto 1	2	3200	102,56	50	4,00641	3,90625
Quarto 2	3	4800	170,36	75	6,65484	3,90625
Quarto 3	2	3200	139,13	50	5,43478	3,90625
Estar Intimo	4	6400	189,49	100	7,40192	3,90625
Circulação	1	1600	164,00	25	7,81250	4,76372
Banheiro	2	2400	154,41	36	6,29371	4,07609
Quarto Casal	5	8000	175,97	125	6,36456	3,61690
Sacada Frontal	2	3200	121,76	50	5,80046	4,76372
Sacada Fundos	1	1600	96,47	25	4,59559	4,76372
Escada	1	1600	177,30	25	8,44595	4,76372
<b>Total do pavimento</b>	-	-	-	561	6,38807	

Fonte: Autoria própria.

Finalmente, como resultado do projeto luminotécnico da residência foi obtido o valor da potência de iluminação total instalada na residência somando as potências de iluminação instaladas em cada um dos cômodos e assim estabelecer a carga de iluminação instalada para cada sistema individualmente, apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Carga de iluminação total instalada na residência - Fluorescente e LED.

Tecnologia de iluminação	Potência de iluminação total instalada [W]
Fluorescente	1366,8
LED	1243

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Segundo Urbanetz Junior (2012) o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado pode ser feito através do seguinte roteiro:

- Estimativa do consumo médio diário de energia (kWh/dia) por meio de um quadro de previsão de cargas;
- Definições tais como: tensão do barramento CC; cargas em CC e/ou CA; autonomia (em dias);
- Dimensionamento da potência de pico do painel FV tendo como base a irradiação solar – Wh/m<sup>2</sup>.dia;
- Dimensionamento do banco de baterias;
- Dimensionamento dos condutores;
- Especificação dos equipamentos do sistema FV: módulos FV; controlador de carga; baterias; inversor; dispositivos de manobra, proteção e medição; sistema de aquisição de dados para monitoramento; aterramento; estruturas de fixação dos módulos;

Após dimensionar e determinar as especificações dos equipamentos foram levantados os custos envolvidos com a aquisição e instalação do sistema fotovoltaico.

Segundo o projeto luminotécnico desenvolvido para a residência anteriormente, chegou-se à potência total dos dois tipos de circuitos de iluminação em estudo, um para o projeto com lâmpada fluorescente e outro para o projeto com lâmpada LED. Cada projeto foi analisado de maneira independente um do outro. A Tabela 16 mostra a carga instalada, que serviu de base no desenvolvimento dos dois projetos fotovoltaicos, um aplicado na iluminação total da residência composta por lâmpadas fluorescentes, e o outro projeto na iluminação total da residência composta por lâmpadas LED, visando compará-los em relação aos custos, parâmetros elétricos, entre outros.

De acordo com o fabricante Philips (2011), no Guia de Compras, as lâmpadas LED têm uma duração média de 25.000 horas considerando um uso médio de 2h30min por dia (2,5 horas), ou seja, utilização por 25 anos sem substituição, enquanto as lâmpadas incandescentes geralmente duram cerca de 8 meses.

As lâmpadas fluorescentes têm sua vida mediana obtida através de testes com ciclo de acendimento de 2h45min (aproximadamente 2,8 horas) energizada e por 15 minutos desenergizada, ciclo repetido 24 horas por dia (ARTEK, 2012).

Com base nas informações de determinação da vida útil das lâmpadas, que no caso das lâmpadas fluorescentes é estimada considerando o ciclo repetido várias vezes durante o dia, e no caso do fabricante Philips estima um consumo médio diário 2h30min, considerou-se 2,8 horas (2h48min) para o tempo de operação nos dimensionamentos fotovoltaicos deste trabalho, que serão detalhados mais adiante. O tempo de operação (utilização) de 2,8 horas foi considerado tanto para projeto com lâmpada fluorescente, quanto para o projeto com lâmpada LED, a fim de avaliar os dois projetos a partir dos mesmos parâmetros de referência. É importante observar que o tempo 2,8 horas serve apenas de base para dimensionamento do sistema fotovoltaico, considerando-se todas as lâmpadas da residência acesas durante esse período diariamente, a fim de se obter a energia demandada diariamente pela carga do sistema.

Com as potências calculadas para os dois circuitos em estudo e o tempo de utilização diário das lâmpadas, estimou-se a energia diária (Wh/dia) demandada nos circuitos, assim como a tensão e corrente no barramento CC, conforme se mostra na Tabela 17. Vale ressaltar que os projetos para os dois tipos de lâmpadas são independentes um do outro.

Tabela 17 - Quadro geral de previsão de cargas para os dois projetos.

Equipamento	Projeto da Iluminação com Lâmpadas Fluorescentes	Projeto da Iluminação com Lâmpadas LED
Potência total [W]	1350,8	1243
Tensão Nominal [Vca]	110	110
Corrente Nominal Total [Aca]	12,28	11,30
Tempo de utilização [h/dia]	2,8	2,8
Energia [Wh/dia]	3782,24	3480,4
Tensão Barramento CC [V]	24	24
Corrente CC estimada - Entrada do inversor [Acc]	56,28	51,79

**Fonte: A autoria própria.**

Conforme Tabela 17, a tensão no barramento CC foi determinada para 24 V a fim de se obter uma corrente mais baixa (em torno de 50 A) do que seria se determinássemos para 12 V, pois caso contrário, a corrente no barramento CC seria em torno de 110 A, afetando outros parâmetros no dimensionamento dos demais equipamentos do sistema fotovoltaico. Mais adiante, é verificado no dimensionamento do banco de baterias, que no caso da tensão do barramento CC ser 24 V, é necessário que as baterias estejam dispostas adequadamente para que o arranjo todo esteja nesta mesma tensão, podendo ser utilizadas duas baterias de 12 V em série para obter-se 24 V no arranjo.

A etapa seguinte mostra o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos. Para isso foi necessário analisar as coordenadas do local onde será projetado o sistema

fotovoltaico e as decorrentes condições de irradiação deste local, que no caso é na cidade de Piraquara, situada no estado do Paraná, Brasil.

Com os valores exatos de latitude e longitude do local, foi possível encontrar valores de latitude  $-25,42^\circ$  e longitude  $-49,08^\circ$  tabelados segundo o Projeto SWERA (onde são encontrados os valores históricos de irradiação global no plano horizontal, média mensal do total diário) que se aproximassem dos valores exatos. Os valores de irradiação global horizontal para a latitude  $-25,42^\circ$  e longitude  $-49,08^\circ$  são encontrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Irradiação incidente no plano horizontal em Piraquara (Lat.  $-25,42^\circ$ ; Long.  $-49,08^\circ$ ).

Período	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Irradiação Global horizontal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]	5,69	5,44	5,01	4,09	3,32	3,05	3,3	4,14	4,18	4,91	6,04	5,87	4,59

Fonte: Autoria própria.

Para maximizar a incidência de radiação solar nos módulos fotovoltaicos (de forma que os raios incidam perpendicularmente sobre os mesmos), em sistemas fotovoltaicos isolados, estes são inclinados geralmente orientados para o norte geográfico e com um ângulo de inclinação que leva em consideração a latitude mais  $10^\circ$  a  $15^\circ$ . Desta forma, para a latitude de  $-25,42^\circ$  encontrada para a localidade, a inclinação dos módulos deve ser de aproximadamente  $35^\circ$ .

A instalação do painel foi feita no telhado da residência, tendo este a inclinação de cerca de  $35^\circ$  (conforme planta baixa), portanto dentro dos valores adequados. No entanto, a sua orientação não se dá exatamente ao norte geográfico, estando deslocado aproximadamente em  $47^\circ$  ao leste (conforme planta baixa).

A correção dos valores de irradiação global horizontal média para a orientação e inclinação descritas foi feita por meio do programa RADIASOL e são apresentados na Tabela 19 e podem ainda ser vistos no gráfico da Figura 43.

Tabela 19 - Irradiação incidente - plano inclinado 35° e orientado 47° leste - em Piraquara (Lat. -25,42°; Long. -49,08°).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Anual
Irradiação – Inclinação: 35° Orientação: 47° L [kWh/m <sup>2</sup> .dia]	5,212	5,117	4,993	4,352	3,737	3,607	4,617
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
	3,902	4,657	4,227	4,704	5,558	5,337	

Fonte: Autoria própria.

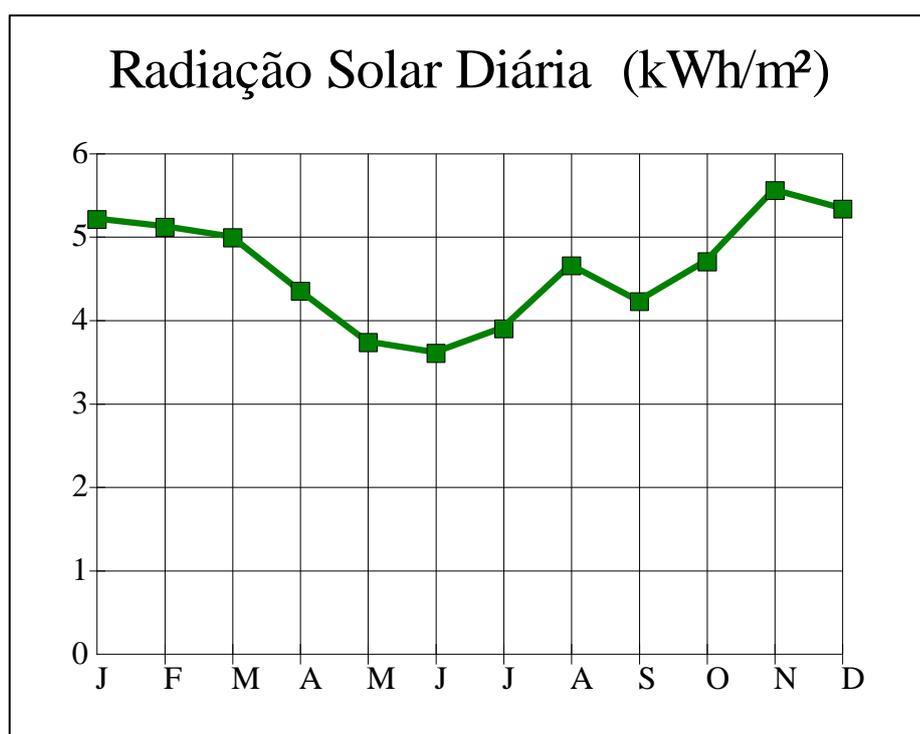


Figura 43 - Radiação solar diária [kWh/m<sup>2</sup>] - inclinada 35° e orientada 47° ao leste - para Piraquara.

Fonte: Autoria própria.

Conforme Urbanetz Junior (2012), para os sistemas fotovoltaicos isolados, devido à variação da irradiação diária média no decorrer do ano, usa-se para o dimensionamento os valores de irradiação mínimos, que no caso correspondem aos meses de inverno. De acordo com a Tabela 19 verificamos que o mês de menor irradiação é o mês de Junho com 3,607 kWh/m<sup>2</sup>.dia, e portanto o dimensionamento será feito com base nesse mês.

### 3.3.1 Dimensionamento do sistema fotovoltaico aplicado na iluminação com lâmpadas fluorescentes

Conhecidas a irradiação solar incidente no plano dos módulos solares e a energia diária demandada pelas cargas do projeto, calculou-se a potência do painel fotovoltaico, a partir da equação 23.

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot R} \cdot F_{CARREG} \quad (23)$$

Onde:

E = energia demandada pelas cargas diariamente [Wh/dia];

G = irradiação nas condições STC (1000 W/m<sup>2</sup>);

H<sub>TOT</sub> = irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos [Wh/m<sup>2</sup>.dia];

F<sub>CARREG</sub> = fator de carregamento diário das baterias (adotado 1,1);

R = rendimento do conjunto de aparelhos e componentes do sistema (este valor situa-se entre 60 e 75 %).

Nos cálculos foi considerado o rendimento de 0,7 (70 %) para o sistema.

Para o dimensionamento fotovoltaico aplicado ao projeto com lâmpadas fluorescentes, a energia demandada diariamente é de 3782,24 Wh/dia, conforme valor da Tabela 17.

Assim temos a equação 24:

$$P_{FV} = \frac{3782,4 \cdot 1000}{3607 \cdot 0,7} \cdot 1,1 = 1647,77 \text{ Wp} \quad (24)$$

A área necessária para instalar esta potência dos painéis fotovoltaicos pode ser obtida pela equação 25. A tecnologia dos painéis policristalinos observada

atualmente, têm sua eficiência de conversão de aproximadamente 14%. Sendo assim, estimou-se a área necessária para o painel fotovoltaico, de forma a atender a potência de pico calculada.

$$A = \left( \frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \cdot 100 \quad (25)$$

Onde:

$P_{FV}$  = potência do painel [kWp];

$E_{FF}$  = eficiência de conversão da tecnologia fotovoltaica usada [%].

$$A = \left( \frac{1,64777}{14} \right) \cdot 100 = 11,78 \text{ m}^2 \quad (26)$$

A partir da área calculada para o painel na equação 26, escolheu-se o módulo fotovoltaico policristalino de 230 Wp, da marca Tecnometal, modelo SV-230D12, que apresenta dimensões de 1645 x 981 x 34 mm, portanto com área de 1,613745 m<sup>2</sup> (MINHA CASA SOLAR, 2013b). As especificações do módulo fotovoltaico estão dispostas na Tabela 43 do ANEXO F.

Dividindo a área de painel necessária pela área do módulo escolhido, obteve-se por meio da Equação 27 o número de módulos ( $N_{\text{módulos}}$ ) necessários para atender a demanda calculada:

$$N_{\text{módulos}} = \left( \frac{11,78}{1,613745} \right) = 7,29 \quad (27)$$

$$N_{\text{módulos}} = 8$$

Sendo necessários 8 módulos de 230 Wp para atender a demanda de 1647,77 Wp, recalcula-se a nova potência de pico que o arranjo fotovoltaico pode disponibilizar, conforme mostra a Equação 28.

$$P_{FV} = 8 \cdot 230 = 1840 \text{ Wp} \quad (28)$$

Portanto, a máxima potência do arranjo fotovoltaico é de 1840 Wp. Para que a tensão no barramento CC seja de 24 V, os módulos devem ser arranjados dois a dois em paralelo, sendo 4 conjuntos em paralelo, onde cada conjunto é constituído por 2 painéis em série.

Após conhecido o painel fotovoltaico para o sistema de iluminação fluorescente, encontrou-se o controlador de carga.

Para o dimensionamento do controlador de carga, conforme visto neste trabalho ao tratar-se de controladores de carga no subitem 2.3.7, existe a possibilidade de dimensioná-lo de maneira prática multiplicando o valor da corrente de curto-circuito dos painéis (Tabela 43 do ANEXO F) por 1,56. Desta maneira, foi obtido como resultado o valor de 52,17, indicando que o controlador de carga escolhido deve possuir uma corrente maior de 52,17 A. Sendo assim, foi escolhido o controlador de carga FlexMax MPPT 60A da marca OutBack de 60 A, sendo assim maior que os 52,17 A. As especificações deste equipamento estão na Tabela 44 do ANEXO F.

Na sequência, dimensionou-se o banco de baterias, conforme referência a norma ABNT NBR 14298: Sistemas fotovoltaicos – banco de baterias – dimensionamento. Esta norma apresenta um roteiro para o correto dimensionamento dos bancos de bateria, bem como, recomendações e definições referentes a estes equipamentos.

#### 3.3.1.1 Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298)

- 1) Nome e descrição do projeto: Projeto fotovoltaico para circuitos de iluminação residencial fluorescente.
- 2) Tensão nominal do sistema: 24 V.
- 3) Período de autonomia: 2 dias (autonomia mínima – subitem 5.1.1.3 – NBR 14298).

## 4) Dados dos consumidores:

Nesta etapa, foram levados em conta outros equipamentos do sistema fotovoltaico que limitam as tensões e correntes no sistema.

Dentre esses equipamentos destaca-se os inversores, pois quando estão em funcionamento consomem uma quantidade de potência, assim aumentam a corrente de operação do sistema (vista na Tabela 17). Assim encontrou-se o inversor adequado para o sistema. Devido a potência instalada das cargas de iluminação fluorescente, no valor de 1350,8 W (Tabela 17), ser uma potência relativamente alta para somente um inversor, foi optado pelo uso de dois inversores de 1000 W do modelo Loud da marca Hayonik. Sendo usado um inversor para o pavimento térreo e outro para o pavimento superior. As especificações do inversor estão na Tabela 45 do ANEXO F.

Portanto, a fim de suprir a demanda de corrente desses componentes, bem como do controlador de carga, foi arbitrado um aumento de 1 A na corrente de operação do sistema fluorescente vista Tabela 17.

Com isto, foi construída a Tabela 20.

Tabela 20 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação fluorescente.

Consumidor	Faixa de Tensão (1)		Corrente de operação [A]	Tempo de operação [h/dia] (2)	Ampères-horas diários [Ah/dia]**
	Tensão mínima [V]	Tensão máxima [V]			
Lâmpadas Fluorescentes	19,60	30,00	57,30	2,8	160,44

Fonte: Autoria própria.

**Nota:**

- (1) para determinação da faixa de tensão, a queda de tensão nos cabos que interligam o inversor ao controlador de carga e a bateria foi desconsiderada. Isso se deve ao fato de estes equipamentos estarem muito próximos um do outro. De acordo com a nota 2, do item 4b do roteiro para dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298), para o caso de consumidores alimentados por inversor, considerar a faixa de tensão de entrada (corrente

contínua do inversor). As informações técnicas dos equipamentos escolhidos para o sistema fotovoltaico estão dispostas na Tabela 45 do ANEXO F.

(2) tempo de operação visto anteriormente na Tabela 17.

5) Resumo dos dados dos consumidores:

- a) Corrente de operação máxima: 57,30 A;
- b) Consumo total diário: 160,44 Ah/dia;
- c) Maior dos valores de corrente de operação: 57,30 A;
- d) Menor valor de tensão máxima: 30,0 V;
- e) Maior valor de tensão mínima: 19,60 V.

6) Capacidade do banco de baterias

- a) Capacidade preliminar não ajustada (autonomia vezes item 5b):  
2 dias (autonomia) x 160,44 Ah/dia = 320,88 Ah;
- b) Máxima profundidade de descarga admitida: 50 %;
- c) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga (valor de 6a dividido por 6b):  
 $320,88 \text{ Ah} / 0,5 = 641,76 \text{ Ah}$ ;
- d) Máxima profundidade de descarga diária: 20 %;
- e) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga diária (valor de 5b dividido por 6d):  
 $160,44 \text{ Ah} / 0,2 = 802,20 \text{ Ah}$ ;
- f) Percentual de capacidade em fim de vida: 80%;
- g) Capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim de vida (valor de 6a dividido por 6f):  
 $320,88 \text{ Ah} / 0,8 = 401,1 \text{ Ah}$ ;
- h) Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga: maior valor dos calculados em 6c, 6e e 6g = 802,20 Ah;
- i) Temperatura média de operação da bateria: 20,00 °C (temperatura média anual considerada no ambiente em que vai se situar o banco de baterias, que no caso estará disposta no sótão da residência);

- j) Fator de correção da capacidade associado à temperatura: 1,05 (conforme Tabela 1 do subitem 5.3.3.2 da NBR 14298);
  - k) Capacidade ajustada para a temperatura média de operação (valor de 6h multiplicado pelo valor de 6j):  
 $802,20 \text{ Ah} \times 1,05 = 842,31 \text{ Ah}$ ;
  - l) Fator de segurança: 10 % (valor mínimo conforme subitem 5.3.3.3 – NBR 14298);
  - m) Capacidade ajustada em função do fator de segurança (valor de 6k vezes 6l):  $842,31 \text{ Ah} \times 1,1 = 926,54 \text{ Ah}$ .
- 7) Tempo de descarga operacional (6m dividido por 5c):  
 $926,31 \text{ Ah} / 57,30 \text{ A} = 16,17 \text{ h}$ .
- 8) Faixa de tensão de operação do sistema:
- a) Tensão mínima ajustada, que o ponto de atuação do sensor de tensão mínima para desconexão do consumidor: 22 V (Tensão mínima de desconexão (LVD) do controlador de carga).  
Como no caso a tensão mínima do LDV do inversor é de 19,60 V, no controlador ajusta-se para 22 V, de modo que a tensão de desconexão das baterias se faz em 22 V.
  - b) Tensão máxima ajustada, que é o ponto de atuação do sensor de tensão máxima de carga: 29 V  
O desligamento da saída por tensão alta no inversor, segundo suas especificações técnicas, se dá em 30 V (Tabela 45 do ANEXO F). Por isso, o controlador de carga escolhido será ajustado para desligar em 29 V, para dar mais segurança às baterias.
- 9) Número de baterias em série:
- a) Tensão máxima de carga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionado: 14,4 V (valor inferior conforme Tabela 58 do ANEXO G);

- b) Número máximo de baterias em série (valor de 8b dividido por 9a, considerar o valor inteiro):  $29 \text{ V}/14,4 \text{ V} = 2$ ;
- c) Tensão final de descarga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionada: 10,5 V (conforme Tabela 58 do ANEXO G);
- d) Tensão final de descarga calculada por bateria (8a dividido por 9b):  $22 \text{ V}/2 = 11 \text{ V}$ ;
- e) Decrementar o número de baterias: não aplicado;
- f) Tensão de carga calculada por bateria: não aplicado;
- g) Preencher o número selecionado de baterias em série, mais apropriado: 2.

#### 10) Seleção da bateria:

- a) Selecionar no catálogo da fabricante a bateria de capacidade menor ou igual à calculada: 170 Ah;
- b) Número de conjuntos (baterias em série) ligados em paralelo (6m dividido por 10a, considerar a parte inteira mais um):  $(926,54 \text{ Ah}/170 \text{ Ah}) + 1 = 5 + 1 = 6$  baterias em paralelo (12 baterias ao total);
- c) Capacidade final do banco de baterias (10a vezes 10b):  
 $170 \text{ Ah} \times 6 \text{ Ah} = 1020 \text{ Ah}$ .

#### 11) Considerações finais:

- a) Máxima corrente de carga recomendada para a bateria após atingida a tensão de gaseificação: Não disponível no catálogo do fabricante;
- b) Corrente máxima gerada pelo arranjo fotovoltaico: 30,68 A (conforme Tabela 43 do ANEXO F);
- c) Temperatura de congelamento do eletrólito referenciado à máxima profundidade de descarga admitida: vide Figura 100 do ANEXO G;
- d) Auto-descarga da bateria: vide Figura 101 do ANEXO G.

12) Itens verificados:

- a) Sobrecarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- b) Subcarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- c) Congelamento do eletrólito: Não aplicável. Ocorre apenas para ambientes com temperatura abaixo de zero graus Celsius;
- d) Auto-descarga: caso haja defeito no controlador de carga.

13) Resumo das especificações da bateria selecionada:

- a) Tipo de bateria: Chumbo-ácido estacionária;
- b) Fabricante: Freedom;
- c) Capacidade nominal: 170 Ah em 20 h;
- d) Tensão nominal por bateria: 12 V;

Composição do acumulador:

- e) Quantidade de baterias em série: 2;
- f) Quantidade de baterias em paralelo: 6;
- g) Capacidade total: 1020 Ah em 20 h;
- h) Tensão nominal: 24 V;
- i) Tensão máxima de carga: 29 V;
- j) Tensão final de descarga: 22 V.

O percentual de queda de tensão nos cabos do lado CC pode ser obtido por meio da equação 29. Por esta equação, também é calculada a área da seção transversal do condutor de cobre.

$$S_{\text{cond}} = \left( \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot 0,0178}{V \cdot \Delta V} \right) \quad (29)$$

Onde:

L = comprimento do condutor [m];

I = corrente total [A];

V = tensão do barramento CC [V];

$S_{\text{cond}}$  = área da seção do condutor [mm<sup>2</sup>].

Os equipamentos do sistema fotovoltaico (painel fotovoltaico, bateria, controlador de carga e inversor), foram dimensionados considerando-os próximos uns aos outros. Desta forma, as distâncias aproximadas entre os componentes são as seguintes:

- Painel fotovoltaico/Controlador de carga – 4 m;
- Controlador de carga/Bateria – 0,5 m;
- Controlador de carga/Inversor – 0,5 m;
- Comprimento total dos cabos em CC – 5 m

Respeitando uma queda de tensão máxima de 4 %, é obtida a área da seção do condutor necessária pela equação 30.

$$S_{\text{cond}} = \left( \frac{2.5.56,28.0,0178}{24.0,04} \right) = 10,44 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

O valor da área mínima necessária foi de  $S_{\text{cond}} = 10,44 \text{ mm}^2$ . Portanto, a bitola comercial de cabo que pode ser encontrada e atende aos requisitos de queda de tensão inferior a 4%, deverá ser a bitola de  $S_{\text{cond}} = 16 \text{ mm}^2$ . Considerando que nessa parte da instalação, dos quais os cabos vão do painel fotovoltaico ao controlador de carga e demais equipamentos do sistema, será projetada para instalação em eletroduto aparente (método de instalação B1, conforme NBR 5410). Conforme fabricante Prysmian (2013), no material de dimensionamento de fios e cabos e cabos elétricos de baixa tensão, quando se tem 2 condutores carregados e o método de instalação é do tipo B1, a capacidade de condução de corrente é de 76 A na utilização dos cabos de  $16 \text{ mm}^2$ . Como a corrente máxima para este circuito é de 57,30 A, ou seja, abaixo de 76 A, portanto, o condutor de  $16 \text{ mm}^2$  atende aos requisitos para essa instalação.

Para o lado CA, como se trata de carga de iluminação, de acordo com a norma ABNT NBR 5410, a bitola mínima é de  $S = 1,5 \text{ mm}^2$ .

### 3.3.2 Dimensionamento do sistema fotovoltaico aplicado na iluminação com lâmpadas LED

Analogamente ao dimensionamento fotovoltaico aplicado às lâmpadas fluorescentes, se fez o dimensionamento fotovoltaico aplicado às lâmpadas LED na residência em estudo.

A partir da irradiação solar incidente no plano dos módulos solares estimada para o mês mais crítico e da energia diária demandada pelas cargas do projeto, calculou-se a potência do painel fotovoltaico, conforme a equação 31. O mês mais crítico no caso, é o mês de Junho com 3,607 kWh/m<sup>2</sup>.dia, conforme foi feito anteriormente no dimensionamento para as lâmpadas fluorescentes.

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot R} \cdot F_{CARREG} \quad (31)$$

Onde:

E = energia demandada pelas cargas diariamente [Wh/dia];

G = irradiação nas condições STC (1000 W/m<sup>2</sup>);

H<sub>TOT</sub> = irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos [Wh/m<sup>2</sup>.dia];

F<sub>CARREG</sub> = fator de carregamento diário das baterias (adotado 1,1);

R = rendimento do conjunto de aparelhos e componentes do sistema (este valor situa-se entre 60 e 75 %).

Da mesma forma, nos cálculos foi considerado o rendimento de 0,7 (70 %) para o sistema.

Para o dimensionamento fotovoltaico aplicado ao projeto com lâmpadas LED, a energia demandada diariamente é de 3480,40 Wh/dia, conforme exposto anteriormente na Tabela 17. Portanto, obtém-se a potência necessária de painel fotovoltaico pela equação 32:

$$P_{FV} = \frac{3480,40 \cdot 1000}{3607,0,7} \cdot 1,1 = 1516,27 \text{ Wp} \quad (32)$$

A área necessária para instalar esta potência dos painéis fotovoltaicos pôde ser obtida pela equação 33. A tecnologia dos painéis policristalinos observada atualmente, têm sua eficiência de conversão de aproximadamente 14%. Sendo assim, estimou-se a área necessária para o painel fotovoltaico, de forma a atender a potência de pico calculada, conforme a equação 33:

$$A = \left( \frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \cdot 100 \quad (33)$$

Onde:

$P_{FV}$  = Potência do painel [kWp];

$E_{FF}$  = eficiência de conversão da tecnologia fotovoltaica usada [%].

$$A = \left( \frac{1,51627}{14} \right) \cdot 100 = 10,83 \text{ m}^2 \quad (34)$$

A partir da área calculada para o painel na equação 34, escolheu-se o mesmo painel utilizado anteriormente no dimensionamento do sistema com lâmpadas fluorescentes. As especificações do painel são: painel do tipo policristalino de 230 Wp, marca Tecnometal, modelo SV-230D12, que apresenta dimensões de 1645 x 981 x 34 mm, portanto com área de 1,613745 m<sup>2</sup> (MINHA CASA SOLAR, 2013b).

Dividindo a área de painel necessária pela área do painel escolhido, obteve-se o número de painéis ( $N_{\text{painéis}}$ ) necessários para atender a demanda calculada por meio da equação 35:

$$N_{\text{painéis}} = \left( \frac{10,83}{1,613745} \right) = 6,711 \quad (35)$$

Como se pretende obter uma tensão de 24 V no barramento CC, optou-se por um arranjo fotovoltaico, de tal forma que estejam dispostos 2 painéis em série.

Desta forma, precisa-se de uma quantidade par de painéis, sendo ligados em série. Portanto, no dimensionamento será necessário o acréscimo de 1 painel, de modo que o arranjo seja constituído por 4 conjuntos em paralelo, sendo cada conjunto composto por 2 módulos em série, conforme é mostrado na equação 36.

$$N_{\text{painéis}} = 6,711 + 1 \rightarrow 8 \text{ painéis} \quad (36)$$

Com este tipo de arranjo, a tensão nominal do sistema é 24 V e as correntes serão 4 vezes a corrente gerada por cada conjunto, da mesma forma como foi feito para o dimensionamento anterior, para as lâmpadas fluorescentes. Com 8 painéis de 230 Wp para atender a demanda de 1516,27 Wp, recalcula-se a nova potência de pico que o arranjo fotovoltaico pode disponibilizar conforme se mostra na Equação 37.

$$P_{\text{FV}} = 8 \cdot 230 = 1840 \text{ Wp} \quad (37)$$

Portanto, a máxima potência do arranjo fotovoltaico é de 1840 Wp. Como as potências totais das cargas fluorescentes foram relativamente próximas, sendo 1667,29 W e 1526,27 W para os sistemas com lâmpadas fluorescentes e LED, respectivamente, conseqüentemente obteve-se a mesma potência de pico de 1840 Wp para o arranjo fotovoltaico. Embora essas potências de pico coincidam, devido à exigência do acréscimo de 1 painel neste sistema com lâmpada LED, mais adiante será demonstrado que outros equipamentos tiveram especificações técnicas diferentes, portanto, diferenciando o sistema com lâmpadas fluorescentes do sistema com lâmpadas LED.

Como se chegou ao mesmo painel fotovoltaico (Tabela 43 do ANEXO F) para ambos os sistemas de iluminação e em mesma quantidade (4 conjuntos de 2 painéis ligados em série). O dimensionamento do controlador de carga aplicado para sistema fotovoltaico para iluminação fluorescente também é válido para a iluminação LED. Portanto, foi usado o mesmo controlador de carga em ambos os projetos (FlexMax MPPT 60 A da marca OutBack). As especificações do controlador estão na Tabela 44 do ANEXO F.

Em seguida, dimensiona-se o banco de baterias a partir da norma NBR 14298, analogamente ao que foi feito no dimensionamento do projeto fotovoltaico aplicado às lâmpadas fluorescentes.

### 3.3.2.1 Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298)

- 1) Nome e descrição do projeto: Projeto fotovoltaico para circuitos de iluminação residencial LED.
- 2) Tensão nominal do sistema: 24 V.
- 3) Período de autonomia: 2 dias (autonomia mínima – subitem 5.1.1.3 – NBR 14298).

4) Dados dos consumidores:

De modo análogo ao dimensionamento para o sistema fotovoltaico para o sistema de iluminação fluorescente. Novamente, foram levados em conta outros equipamentos do sistema fotovoltaico, que limitam as tensões e correntes no sistema. Como no caso visto com o sistema de iluminação fluorescente, o inversor foi estipulado com base na potência instalada, que para o caso do sistema de iluminação LED foi de 1243 W (Tabela 17). Assim novamente, foram usados dois inversores de 1000 W do modelo Loud da marca Hayonik, um para o pavimento térreo e outro para o pavimento superior. As especificações do inversor estão na Tabela 45 do ANEXO F.

Sendo que novamente, a fim de suprir a demanda de corrente dos inversores e do controlador de carga, foi arbitrado um aumento de 1 A na corrente de operação do sistema LED encontrada na Tabela 17.

Com isto construiu-se a Tabela 21.

Tabela 21 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação LED.

Consumidor	Faixa de Tensão (1)		Corrente de operação [A]	Tempo de operação [h/dia] (2)	Ampères-horas diários [Ah/dia]**
	Tensão mínima [V]	Tensão máxima [V]			
Lâmpadas LED	19,60	30,00	52,80	2,8	147,84

Fonte: Aatoria própria.

**Nota:**

- (1) para determinação da faixa de tensão, a queda de tensão nos cabos que interligam o inversor ao controlador de carga e a bateria foi desconsiderada. Isso se deve ao fato de estes equipamentos estarem muito próximos um do outro. De acordo com a nota 2, do item 4b do roteiro para dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298), para caso de consumidores alimentados por inversor, considerar a faixa de tensão de entrada (corrente contínua do inversor). As informações técnicas dos equipamentos escolhidos para o sistema fotovoltaico estão dispostas na Tabela 45 do ANEXO F.
- (2) tempo de operação visto anteriormente na Tabela 17.

5) Resumo dos dados dos consumidores:

- a) Corrente de operação máxima: 52,80 A;
- b) Consumo total diário: 147,84 Ah/dia;
- c) Maior dos valores de corrente de operação: 52,80 A;
- d) Menor valor de tensão máxima: 30,0 V;
- e) Maior valor de tensão mínima: 19,60 V.

6) Capacidade do banco de baterias

- a) Capacidade preliminar não ajustada (autonomia vezes item 5b):  
2 dias (autonomia) x 147,84 Ah/dia = 295,68 Ah;
- b) Máxima profundidade de descarga admitida: 50 %;
- c) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga (valor de 6a dividido por 6b):  
 $295,68 \text{ Ah} / 0,5 = 591,36 \text{ Ah}$ ;
- d) Máxima profundidade de descarga diária: 20 %;

- e) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga diária (valor de 5b dividido por 6d):  
 $147,84 \text{ Ah} / 0,2 = 739,20 \text{ Ah};$
  - f) Percentual de capacidade em fim de vida: 80 %;
  - g) Capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim de vida (valor de 6a dividido por 6f):  
 $295,68 \text{ Ah} / 0,8 = 369,60 \text{ Ah};$
  - h) Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga: maior valor dos calculados em 6c, 6e e 6g = 739,20 Ah;
  - i) Temperatura média de operação da bateria: 20,00 °C (temperatura média anual considerada no ambiente em que vai se situar o banco de baterias, que no caso estará disposta no sótão da residência);
  - j) Fator de correção da capacidade associado à temperatura: 1,05 (conforme Tabela 1 do subitem 5.3.3.2 da NBR 14298);
  - k) Capacidade ajustada para a temperatura média de operação (valor de 6h multiplicado pelo valor de 6j):  
 $739,20 \text{ Ah} \times 1,05 = 776,16 \text{ Ah};$
  - l) Fator de segurança: 10 % (valor mínimo conforme subitem 5.3.3.3 – NBR 14298);
  - m) Capacidade ajustada em função do fator de segurança (valor de 6k vezes 6l):  $776,16 \text{ Ah} \times 1,1 = 853,78 \text{ Ah}.$
- 7) Tempo de descarga operacional (6m dividido por 5c):  
 $853,78 \text{ Ah} / 52,80 \text{ A} = 16,17 \text{ h}.$
- 8) Faixa de tensão de operação do sistema:
- a) Tensão mínima ajustada, que o ponto de atuação do sensor de tensão mínima para desconexão do consumidor: 22 V (idem 8a do subitem 3.3.1.1 deste trabalho);
  - b) Tensão máxima ajustada, que é o ponto de atuação do sensor de tensão máxima de carga: 29 V (idem 8b do subitem 3.3.1.1 deste trabalho).

## 9) Número de baterias em série:

- a) Tensão máxima de carga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionado: 14,4 V (valor inferior conforme Tabela 58 do ANEXO G);
- b) Número máximo de baterias em série (valor de 8b dividido por 9a, considerar o valor inteiro):  $29 \text{ V} / 14,4 \text{ V} = 2$ ;
- c) Tensão final de descarga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionada: 10,5 V (conforme Tabela 58 do ANEXO G);
- d) Tensão final de descarga calculada por bateria (8a dividido por 9b):  $22 \text{ V} / 2 = 11 \text{ V}$ ;
- e) Decrementar o número de baterias: não aplicado;
- f) Tensão de carga calculada por bateria: não aplicado;
- g) Preencher o número selecionado de baterias em série, mais apropriado: 2.

## 10) Seleção da bateria:

- a) Selecionar no catálogo da fabricante a bateria de capacidade menor ou igual à calculada: 150 Ah;
- b) Número de conjuntos (baterias em série) ligados em paralelo (6m dividido por 10a, considerar a parte inteira mais um):  $(853,78 \text{ Ah} / 150 \text{ Ah}) + 1 = 5 + 1 = 6$  baterias em paralelo (12 baterias ao total);
- c) Capacidade final do banco de baterias (10a vezes 10b):  
 $150 \text{ Ah} \times 6 \text{ Ah} = 900 \text{ Ah}$ .

## 11) Considerações finais:

- a) Máxima corrente de carga recomendada para a bateria após atingida a tensão de gaseificação: Não disponível no catálogo do fabricante;
- b) Corrente máxima gerada pelo arranjo fotovoltaico: 30,68 A (conforme Tabela 43 do ANEXO F);

- c) Temperatura de congelamento do eletrólito referenciado à máxima profundidade de descarga admitida: vide Figura 100 do ANEXO G;
- d) Auto-descarga da bateria: vide Figura 101 do ANEXO G.

12) Itens verificados:

- a) Sobrecarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- b) Subcarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- c) Congelamento do eletrólito: Não aplicável. Ocorre apenas para ambientes com temperatura abaixo de zero graus Celsius;
- d) Auto-descarga: caso haja defeito no controlador de carga.

13) Resumo das especificações da bateria selecionada:

- a) Tipo de bateria: Chumbo-ácido estacionária;
  - b) Fabricante: Freedom;
  - c) Capacidade nominal: 150 Ah em 20 h;
  - d) Tensão nominal por bateria: 12 V;
- Composição do acumulador:
- e) Quantidade de baterias em série: 2;
  - f) Quantidade de baterias em paralelo: 6;
  - g) Capacidade total: 900 Ah em 20 h;
  - h) Tensão nominal: 24 V;
  - i) Tensão máxima de carga: 29 V;
  - j) Tensão final de descarga: 22 V.

Tendo em vista um percentual de queda de tensão nos cabos do lado CC de 4 %, por meio da equação 38, é calculada a área da seção transversal do condutor de cobre.

$$S_{\text{cond}} = \left( \frac{2.11.0,0178}{V \cdot \Delta V} \right) \quad (38)$$

Onde:

L = comprimento do condutor [m];

I = corrente total [A];

V = tensão do barramento CC [V];

$S_{\text{cond}}$  = área da seção do condutor [mm<sup>2</sup>].

Como no sistema com lâmpadas fluorescentes, os equipamentos do sistema fotovoltaico (painel fotovoltaico, bateria, controlador de carga e inversor), foram dimensionados considerando-os próximos uns aos outros. Desta forma, as distâncias aproximadas entre os componentes são as seguintes:

- Painel fotovoltaico/Controlador de carga – 4 m;
- Controlador de carga/Bateria – 0,5 m;
- Controlador de carga/Inversor – 0,5 m;
- Comprimento total dos cabos em CC – 5 m

Respeitando uma queda de tensão máxima de 4 %, foi obtida a área da seção do condutor necessária pela equação 39.

$$S_{\text{cond}} = \left( \frac{2.5.51,79.0,0178}{24.0,04} \right) = 9,6027 \text{ mm}^2 \quad (39)$$

O valor da área mínima necessária foi de  $S_{\text{cond}} = 9,6027 \text{ mm}^2$ . Portanto, a bitola comercial de cabo que pode ser encontrada, próxima a esse valor calculado, é a de bitola  $S_{\text{cond}} = 10 \text{ mm}^2$ . Considerando que nessa parte da instalação, dos quais os cabos vão do painel fotovoltaico ao controlador de carga e demais equipamentos do sistema, será projetada para instalação em eletroduto aparente (método de instalação B1, conforme NBR 5410). Conforme fabricante PRYSMIAN (2013), no material de dimensionamento de fios e cabos e cabos elétricos de baixa tensão, quando se tem 2 condutores carregados e o método de instalação é do tipo B1, a capacidade de condução de corrente é de 57 A na utilização dos cabos de 10 mm<sup>2</sup>. Como a corrente máxima para este circuito é de 52,80 A, ou seja, abaixo de 57 A,

portanto, o condutor de 10 mm<sup>2</sup> atende aos requisitos para essa instalação, além da queda de tensão ser inferior a 4%.

Para o lado CA, como se trata de carga de iluminação, de acordo com a norma ABNT NBR 5410, a bitola mínima é de  $S = 1,5 \text{ mm}^2$ .

Após o dimensionamento dos dois projetos em questão, um destinado ao circuito de iluminação composto de lâmpadas fluorescente e outro de lâmpadas LED, monta-se a Tabela 22, para efeitos de comparação do que foi dimensionado.

O circuito final do sistema fotovoltaico para ambas os circuitos de iluminação fluorescente e LED pode ser visto na Figura 44.

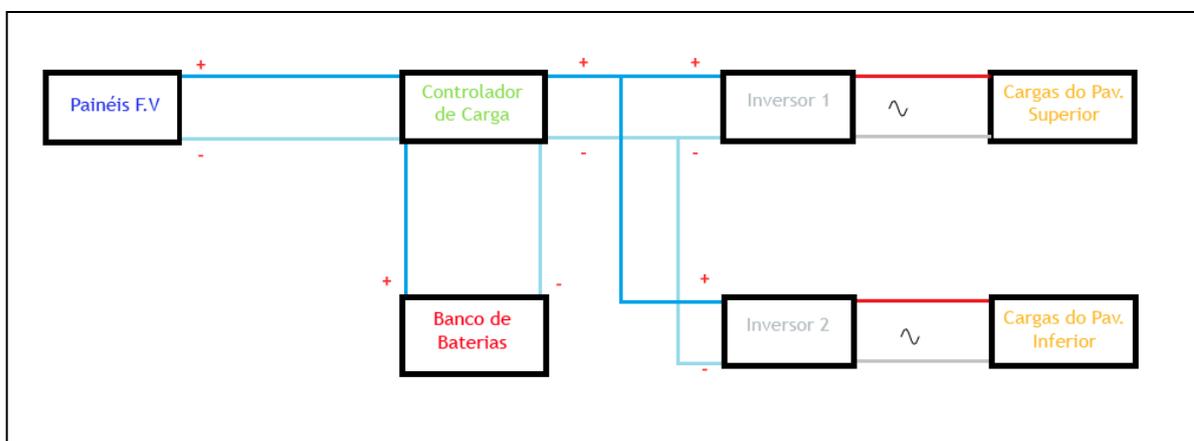


Figura 44 - Circuito final do sistema fotovoltaico para os circuitos de iluminação fluorescente e LED da residência

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 - Resumo Comparativo dos Dimensionamentos dos Bancos de Baterias - LED e fluorescente.

<b>Especificação</b>	<b>Fluorescente</b>	<b>LED</b>
Tensão nominal do sistema [V]	24	24
Período de autonomia [dias]	2	2
Tempo de utilização [h]	2,8	2,8
Corrente de operação máxima [A]	57,30	52,80
Consumo total diário [Ah]	160,44	147,84
Maior dos valores de corrente de operação [A]	57,30	52,80
Menor valor de tensão máxima [V]	30,00	30,00
Maior valor de tensão mínima [V]	19,60	19,60
Tipo de elemento	Chumbo-ácido	Chumbo-ácido
Fabricante	Freedom	Freedom
Modelo	DF3000	DF2500
Capacidade nominal por bateria (C <sub>20</sub> ) [Ah]	170	150
Tensão nominal por bateria [V]	12	12
Quantidade de baterias em série	2	2
Quantidade de baterias em paralelo	6	6
Capacidade total [Ah]	1020	900
Tensão nominal [V]	24	24
Tensão máxima de carga [V]	29	29
Tensão final de descarga [V]	22	22

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Para comparar as duas tecnologias de iluminação de maneira efetiva, por meio de análise experimental, foi necessário o desenvolvimento de dois protótipos, um para cada sistema de iluminação. Os protótipos foram construídos de tal maneira que representassem uma amostragem de como o sistema projetado para toda a residência se comportaria. Assim foi necessária a escolha de um dos cômodos da casa para a construção desse protótipo.

Como fatores relevantes à escolha do cômodo de ensaio, podem-se destacar:

- Facilidade na adaptação do cômodo para as condições de ensaio: a residência se encontra ainda em construção, desta forma muitos cômodos servem como abrigo para materiais de construção e também existem cômodos que não possuem piso (cômodos do pavimento térreo) com chão de terra batida.
- Dimensões dos cômodos: foi procurado um cômodo que não possuísse uma grande área de plano de trabalho, que reflète indiretamente na demanda de potência total necessária para iluminar o ambiente, e que possuísse forma próxima a retangular. Assim facilitando a verificação e análise das iluminâncias no cômodo.

Tendo em vista os fatores descritos acima, foi escolhido como ambiente de ensaio o Quarto 1, situado no pavimento superior.

#### 3.4.1 O ambiente de ensaio – Quarto 1

Para a realização dos ensaios foi usado o Quarto 1. Este quarto foi adaptado para que se aproximasse ao máximo das condições de um cômodo em seu estado final - acabado, com porta, janela e pintura nas paredes e teto. Esses fatores auxiliam em uma melhor adequação do ambiente para o ensaio e, conseqüentemente, obtêm-se valores mais condizentes com os valores reais.

Devido à grande influência nos valores de iluminância proporcionada pelas refletâncias das paredes, teto e piso, todas as paredes do ambiente, bem como o teto, foram tingidos de branco. Como se trata de um ambiente inacabado de uma residência em construção e também devido o custo, não foram usadas tintas, mas sim cal virgem (óxido de cálcio), comumente usado na construção civil, juntamente com água. Desta forma obteve-se uma “nata” de coloração branca com a qual foi possível tingir as paredes e o teto do ambiente de ensaio de uma forma suficientemente homogênea (ver Figura 79 e Figura 80 do APÊNDICE A).

Foram construídas ainda a porta e a janela do cômodo. A porta foi construída com madeira na coloração escura, próxima a cor marrom (Figura 80 do APÊNDICE A), e a janela construída com estrutura de madeira e lona plástica transparente (Figura 79 do APÊNDICE A).

Tendo como referência o projeto luminotécnico teórico para a residência, é possível verificar as características físicas e de iluminação relativas a este cômodo na Tabela 23 e as características referentes a luminária e lâmpadas usadas nesta etapa do cálculo na Tabela 24.

**Tabela 23 - Características físicas e de iluminação - Quarto 1 .**

<b>Características do cômodo</b>		
Perímetro [m]		14,15
Pé-direito [m]		2,50
Pé-direito Útil [m]		1,70
Área do plano de trabalho (Apt) [m <sup>2</sup> ]		12,48
Área da parede (Ap) [m <sup>2</sup> ]		24,06
Área do teto (At) [m <sup>2</sup> ]		12,48
Índice do Recinto (K)		1,037622
Fator de Depreciação (Fd)		1,25
Coeficiente de Reflexão	Teto	0,7
	Paredes	0,5
	Piso	0,1
<b>Características da iluminação</b>		
Iluminância Média Necessária [lx]		100
Temperatura de Cor [K]		2700
Índice de Reprodução de Cores (IRC) [%]		> 80

**Fonte: Autoria própria.**

Tabela 24 - Características das lâmpadas - Projeto luminotécnico teórico do quarto 1.

<b>Especificações das lâmpadas</b>		
Sistema de iluminação	Fluorescente	LED
Marca	Philips	Philips
Modelo	PLWTWIST27W127B	EnduraLED A19 Bulb
Potência [W]	27	12,5
Tensão [V]	110 - 127	110 - 130
Fluxo luminoso por lâmpada [lm]	1750	800
Eficiência luminosa [lm/W]	65	64
Temperatura de Cor [K]	2700	2700
Índice de Reprodução de Cores (IRC)	82	80
Vida mediana [horas]	8000	25000
Quantidade calculada necessária de lâmpadas	1,78286	3,9
Quantidade final de lâmpadas	2	4
<b>Cálculo de controle</b>		
Quantidade de luminárias na instalação	1	2
Fluxo luminoso alcançado [lm]	3500	3200
Iluminância alcançada [lx]	112,1795	102,5641
<b>Consumo da instalação</b>		
Potência instalada [W]	54	50
Densidade de potência [W/m <sup>2</sup> ]	4,32692	4,00641
Densidade de potência relativa [W/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]	3,85714	3,90625

**Fonte: Autoria própria.**

Com base nos resultados obtidos no projeto luminotécnico teórico da residência é possível verificar que, ao ser usada a luminária Rubi da empresa Itaim, existiu a necessidade de serem usadas quatro lâmpadas LED do modelo relacionado para ser obtida a iluminância média necessária pela norma NBR 5413 – Iluminância de interiores. Portanto, devido cada luminária permitir o uso de apenas duas

lâmpadas, seriam necessárias duas luminárias deste modelo para alocar as quatro lâmpadas LED necessárias. No entanto, este fato resultaria em uma reestruturação do ponto de luz já disposto no cômodo, o que não é intenção deste trabalho, e também faria com que houvesse condições de ensaio distintas para cada tecnologia, o que prejudica a comparação das lâmpadas.

Como as quantidades calculadas de lâmpadas LED do modelo escolhido (EnduraLED A19 bulb) e de lâmpadas fluorescentes do modelo escolhido (PLWTWIST27W127B) foram diferentes, para garantir uma comparação prática adequada, foi pesquisado dentre os modelos ofertados no comércio uma nova lâmpada fluorescente que melhor se adequasse às necessidades do cômodo e que possuísse um fluxo luminoso próximo ao das lâmpadas LED, assim resultando na mesma quantidade de lâmpadas LED do modelo EnduraLED A19 bulb, que foi o modelo de lâmpada LED adquirido por ser, dentre os modelos pesquisados, o que apresentava melhores condições de comparação frente às lâmpadas fluorescentes. Sendo escolhido o modelo TKT 15-2-2K7 da empresa Taschibra.

Desta forma foi necessária uma adequação do projeto luminotécnico teórico realizado para o Quarto 1, a fim de garantir um ambiente de ensaio em iguais condições e permitindo a avaliação dos mesmos parâmetros para ambas as tecnologias, proporcionando uma comparação somente entre as lâmpadas escolhidas e suas características.

#### 3.4.2 Adequação do projeto luminotécnico para o protótipo

A adequação do projeto luminotécnico para o Quarto 1, teve como ponto de partida a substituição da luminária Rubi, da empresa Itaim, por uma alternativa que permitisse o uso de um número maior de lâmpadas.

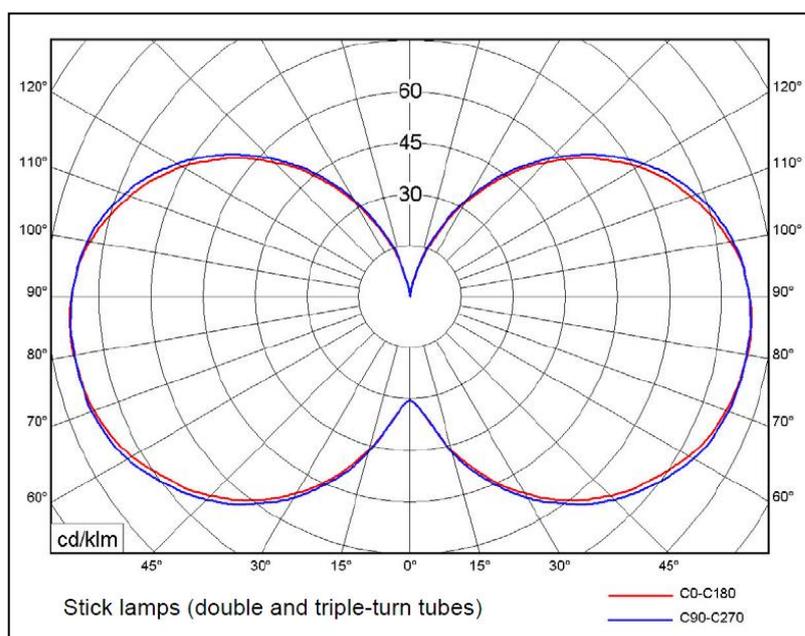
A aquisição de uma luminária com disponibilidade para três e quatro lâmpadas foi pesquisada, mas a sua menor oferta no mercado e ausência de informações como seu fator de utilização (Fu) ou sua curva de distribuição luminosa não permitiram seu uso. Além desses fatores, a necessidade de ser uma luminária aberta, que permita a circulação de ar, impossibilitaram essa alternativa.

Com isto, a alternativa escolhida foi a colocação das lâmpadas nuas no cômodo, junta postas de forma a funcionarem como um único ponto de luz no teto. Desta maneira, os coeficientes de utilização dependem unicamente das Curvas de distribuição luminosas (CDL) das lâmpadas e da maneira como foram postas no ambiente, ou seja, nuas.

Para a inserção das lâmpadas no cômodo foi montado um suporte com 4 bocais de lâmpadas posicionados formando um quadrado de 8 cm de lado.(Figura 82 do APÊNDICE A).

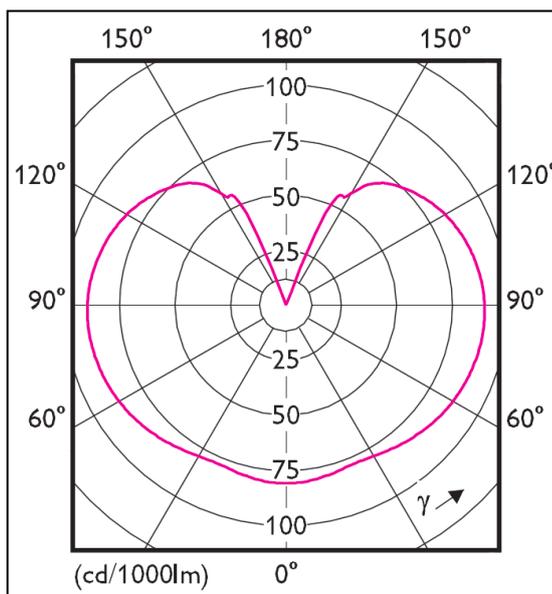
Para calcular os novos valores para os coeficientes de utilização, se fez necessária a obtenção das curvas de distribuição luminosa (CDL) das lâmpadas usadas no protótipo: a lâmpada fluorescente do modelo TKT 15-2-2K7, da empresa Taschibra e a lâmpada LED do modelo EnduraLED A19 bulb, da empresa Philips. As especificações dessas lâmpadas são encontradas na Tabela 62 do ANEXO H.

A lâmpada fluorescente do modelo TKT 15-2-2K7 (vista na figura Figura 83 do APÊNDICE A), por ser uma lâmpada fluorescente compacta de bulbo triplo (3U), apresenta uma curva de distribuição luminosa (CDL) equivalente a apresentada na Figura 45. Enquanto que a lâmpada LED do modelo EnduraLED A19 bulb (vista na Figura 82 do APÊNDICE A) apresenta uma curva equivalente a apresentada na Figura 46.



**Figura 45 - Curva de distribuição luminosa para lâmpadas compactas fluorescentes - 2U/3U.**

**Fonte: Adaptado de OSRAM (2013)**



**Figura 46 - Curva de distribuição luminosa  
- EnduraLED A19 bulb.  
Fonte: Adaptado de Philips (2013)**

Com as curvas de distribuição luminosa (CDL) para os dois modelos de lâmpadas escolhidos pode-se estabelecer o valor de eficiência do recinto ( $\eta_r$ ) para cada uma delas separadamente, consultando as tabelas do ANEXO I. Nestas tabelas são encontradas curvas de distribuição luminosa genéricas separadas por grupos (Grupo da luminária) onde foi localizada uma curva de distribuição luminosa que mais se assemelhasse a curva de cada lâmpada.

Conhecida a curva mais adequada, por meio das refletâncias iniciais estabelecidas na Tabela 3Tabela 5, e valor tabelado mais próximo ao índice do recinto (K) calculado para o Quarto 1 no valor 1,037182, pode-se então estabelecer o grupo da luminária e o valor de eficiência do recinto ( $\eta_r$ ) encontrado na Tabela 25.

Como as lâmpadas foram inseridas no cômodo por meio de um suporte, não sendo uma luminária convencional, ao verificar as possibilidades para o valor de eficiência da luminária ( $\eta_L$ ), obtido por meio do ANEXO J, a condição mais próxima a encontrada no cômodo foi a de “Luminárias abertas com lâmpadas nuas” que apresenta 0,9 como sendo o valor de eficiência da luminária ( $\eta_L$ ).

Conhecidos os valores de eficiência do recinto e eficiência da luminária pôde-se estabelecer o valor do fator de utilização ( $F_u$ ), por meio da equação 40, para cada um dos modelos de lâmpadas escolhidos e então determinar o fluxo luminoso

necessário para o Quarto 1 (Tabela 25) para as condições de ensaio de cada modelo de lâmpada.

$$F_u = \eta_L \cdot \eta_R \quad (40)$$

Tabela 25 - Fator de utilização e fluxo luminoso necessário recalculado para o protótipo.

Modelo da lâmpada	Grupo da luminária	Eficiência da luminária ( $\eta_L$ )	Eficiência do recinto ( $\eta_R$ )	Fator de utilização ( $F_u$ )	Fluxo luminoso necessário [lx]
TKT 15-2-2K7	C3	0,66	0,9	0,594	2626,2626
EnduraLED A19 bulb	B4	0,71	0,9	0,639	2441,3146

Fonte: Autoria própria.

Com os novos valores de fluxo luminoso necessários foi estabelecido o número de lâmpadas necessário para cada protótipo (por meio da equação 20), o fluxo luminoso e a iluminância alcançados, a potência instalada, a densidade de potência e a densidade de potência relativa resultantes. Esses valores estão dispostos na Tabela 26.

Como se vê na Tabela 26, a tensão de alimentação da lâmpada fluorescente é de 220 V. No entanto, o inversor usado possui saída em 110 V, desta forma se fez necessário o uso de um transformador para elevar a sua tensão de saída. Para igualdade de condições, embora a lâmpada LED possua uma tensão de alimentação em 110 V, o transformador também foi usado com a função de autotransformador.

Tabela 26 - Características das lâmpadas - Projeto luminotécnico prático do quarto 1.

<b>Especificações das lâmpadas</b>		
Sistema de iluminação	Fluorescente	LED
Marca	Taschibra	Philips
Modelo	TKT 15-2-2K7	EnduraLED A19 Bulb
Potência [W]	15	12,5
Tensão [V]	220 - 240	110 - 130
Fluxo luminoso por lâmpada [lm]	819	800
Eficiência luminosa [lm/W]	54	64
Temperatura de Cor [K]	2700	2700
Índice de Reprodução de Cores (IRC)	> 80	80
Vida mediana [horas]	6000	25000
Quantidade calculada necessária de lâmpadas	3,20667	3,282828
Quantidade final de lâmpadas	4	4
<b>Cálculo de controle</b>		
Quantidade de luminárias na instalação	1	1
Fluxo luminoso alcançado [lm]	3276	3200
Iluminância alcançada [lx]	124,74	131,08
<b>Consumo da instalação</b>		
Potência instalada [W]	54	50
Densidade de potência [W/m <sup>2</sup> ]	4,32692	4,00641
Densidade de potência relativa [W/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]	3,85714	3,90625

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.4.3 Dimensionamento do sistema fotovoltaico para o protótipo.

O dimensionamento do protótipo foi feito de forma similar aos dimensionamentos vistos anteriormente para o sistema de iluminação total da residência com lâmpadas fluorescentes e LED. No entanto, o desenvolvimento do

protótipo foi feito a partir da disponibilidade de dois módulos fotovoltaicos da marca Heliodinâmica do modelo HM – 45D12, e desta maneira suas características técnicas (encontradas na Tabela 61 do ANEXO H), extraordinariamente se tornaram parâmetros básicos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Conhecidos os parâmetros do painel fotovoltaico se tornou possível encontrar o controlador de carga adequado para a montagem. Tendo o valor da corrente de curto circuito do painel e o multiplicando por 1,56 foi possível dimensionar o controlador de carga, tendo em mente que a ligação dos painéis foi feita em paralelo. Assim se obteve como resultado 9,048, significando que o controlador de carga adequado deve possuir corrente superior a 9,048 A, sendo escolhido um controlador de carga de 15 A. As especificações deste equipamento estão disponíveis na Tabela 63 do ANEXO H.

Com o objetivo de se descobrir o maior tempo de utilização possível das lâmpadas fluorescentes, por apresentarem o caso mais crítico, denominou-se a variável “t” para o tempo de utilização diário exposto na Tabela 27, que foi estimado mais adiante pela equação 42.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico teve como início a estimativa de carga oriunda do projeto luminotécnico do protótipo de cada lâmpada escolhida conforme a Tabela 27.

Tabela 27 - Quadro de previsão de cargas do protótipo.

Equipamento	Lâmpadas Fluorescentes	Lâmpadas LED
Potência unitária [W]	15	12,5
Quantidade	4	4
Potência total [W]	60	50
Tensão Nominal [Vca]	220	127
Corrente Nominal [Aca]	0,273	0,394
Tempo de utilização [h/dia]	t	t
Energia [Wh/dia]	60 x t	50 x t
Corrente CC estimada - Entrada do inversor [Acc]	5	4,167

Fonte: autoria própria.

Conhecidos os valores de pico dos módulos fotovoltaicos disponíveis, para encontrar a quantidade máxima de horas de utilização diária, se fez necessário o conhecimento da irradiação, em kWh/m<sup>2</sup>.dia, incidente em Piraquara, localidade onde foi desenvolvido o protótipo.

A instalação do painel foi feita no telhado da residência sendo este inclinado cerca de 35° (conforme planta baixa), portanto dentro dos valores adequados. No entanto, a sua orientação não se dá exatamente ao norte geográfico, estando deslocado cerca de 47° ao leste (conforme planta baixa). A correção dos valores de irradiação global horizontal média para a orientação e inclinação descritas foi feita por meio do programa RADIASOL, obtendo-se os mesmo valores encontrados nos dimensionamentos vistos anteriormente. O dimensionamento do protótipo também se baseou no mês de menor irradiação verificado anualmente, ou seja, no mês de Junho com irradiação estimada de 3,607 kWh/m<sup>2</sup>.dia (Tabela 19).

A potência do painel fotovoltaico pode ser obtida por meio da Equação 41. No caso, a potência de pico de cada painel disponível é de 45 Wp, totalizando 90 Wp. Por meio da mesma equação 41 pôde ser obtido o tempo máximo de utilização das lâmpadas.

$$P_{FV} = \frac{E \cdot G}{H_{TOT} \cdot R} \cdot F_{CARREG} \quad (41)$$

Onde:

E = energia demandada pelas cargas diariamente [Wh/dia];

G = irradiação nas condições STC (1000 W/m<sup>2</sup>);

H<sub>TOT</sub> = irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos [Wh/m<sup>2</sup>.dia];

F<sub>CARREG</sub> = fator de carregamento diário das baterias (adotado 1,1);

R = rendimento do conjunto de aparelhos e componentes do sistema (este valor situa-se entre 60 e 75 %).

Para o rendimento foi usado o valor de 0,7 (70 %).

$$90 = \frac{60.t.1000}{3607.0,7} \cdot 1,1 \quad (42)$$

Por meio da Equação 42 obteve-se um valor de  $t = 3,443$  horas, ou seja, 3h25min. Este período representa o tempo máximo que este sistema pode operar diariamente, respeitando as condições de irradiação mais crítica do local, potência demandada pela carga e a potência de pico dos dois painéis fotovoltaicos disponíveis. No entanto, nos dimensionamentos feitos anteriormente foi considerado o consumo médio diário estimado em 2h48min (2,8 horas). Portanto, para o dimensionamento do protótipo será adotado esse mesmo critério de tempo de utilização, observando-se que 2h48min se mostra aceitável para este sistema fotovoltaico por ser um período inferior ao tempo máximo de 3h25min (3,443 horas).

A área necessária para instalar a potência dos painéis fotovoltaicos pôde ser obtida pela equação 43. Contudo, são conhecidos os valores da potência dos painéis e também suas dimensões, podendo ser obtido o valor do rendimento dos painéis.

$$A = \left( \frac{P_{FV}}{E_{FF}} \right) \cdot 100 \quad (43)$$

Onde:

$P_{FV}$  = Potência do painel [kWp];

$E_{FF}$  = eficiência de conversão da tecnologia fotovoltaico usada [%].

Substituindo os valores conhecidos e isolando a eficiência na equação 43 temos a equação 44:

$$E_{FF} = \left( \frac{0,045}{1,007.0,402} \right) \cdot 100 = 11,12 \% \quad (44)$$

Portanto, a eficiência de cada painel usado é de aproximadamente  $E_{FF} = 11,12 \%$ .

O dimensionamento do banco de baterias também teve como referencia a norma ABNT NBR 14298: Sistemas fotovoltaicos – banco de baterias – dimensionamento.

Para o dimensionamento das baterias foi necessário contar com a influência de outros equipamentos encontrados no sistema fotovoltaico que limitam as tensões e correntes no sistema. Desta maneira foi necessário encontrar o inversor adequado para as cargas de iluminação usadas no protótipo. Como visto na Tabela 26 a carga instalada para as lâmpadas fluorescentes foi de 60 W assim foi escolhido um inversor de 150 W para suprir essas cargas. As características e especificações do inversor são apresentadas na Tabela 64 do ANEXO H.

Foi considerado ainda para cada um dos sistemas de iluminação uma corrente de operação 1 A maior que a calculada na Tabela 26. Este procedimento foi realizado a fim de ponderar os valores de corrente dos demais componentes do sistema fotovoltaicos bem como dar uma margem de segurança maior para o sistema. Foram considerados no valor da corrente de operação vista na Tabela 28, o consumo de corrente do inversor (0,350 A), o valor da corrente consumida pelo controlador de carga (< 4 mA), bem como o aumento da carga oriundo da existência dos resistores “*shunt*” e do transformador, usado para elevar o valor da tensão de saída do inversor.

#### 3.4.3.1 Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298) – Protótipo para o sistema de iluminação fluorescente

- 1) Nome e descrição do projeto: Protótipo do sistema fotovoltaico de iluminação residencial fluorescente.
- 2) Tensão nominal do sistema: 12 V.
- 3) Período de autonomia: 2 dias (autonomia mínima – subitem 5.1.1.3 – NBR 14298).

## 4) Dados dos consumidores:

Tabela 28 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação fluorescente.

Consumidor	Faixa de Tensão (1)		Corrente de operação [A]	Tempo de operação [h/dia] (2)	Ampères-horas diários [Ah/dia]**
	Tensão mínima [V]	Tensão máxima [V]			
Lâmpadas Fluorescentes	10,00~10,75	15,00	6,0	2,8	16,8

Fonte: Autorial própria.

**Nota:**

- (1) a queda de tensão nos cabos que interligam o inversor ao controlador de carga e a bateria foi desconsiderada por estarem muito próximos. No entanto, devido a necessidade de um sistema de monitoramento para o sistema fotovoltaico, foi inserido no circuito um resistor “*shunt*” (sistema de monitoramento que será descrito a seguir) com a função de monitorar a corrente circulante nos cabos que levam ao inversor e, como há uma queda de tensão nesses componentes, foi levada em conta sua queda máxima, no valor de 0,750 V, nos cálculos.
- (2) tempo de operação estimado visto na Tabela 17.

## 5) Resumo dos dados dos consumidores:

- a) Corrente de operação máxima: 6,00 A;
- b) Consumo total diário: 16,80 Ah/dia;
- c) Maior dos valores de corrente de operação: 6,00 A;
- d) Menor valor de tensão máxima: 15,00 V;
- e) Maior valor de tensão mínima: 10,75 V.

## 6) Capacidade do banco de baterias

- a) Capacidade preliminar não ajustada (autonomia vezes item 5b):  
2 dias x 16,80 Ah/dia = 33,60 Ah;
- b) Máxima profundidade de descarga admitida: 50 %;
- c) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga (valor de 6a dividido por 6b): 33,60 Ah/0,5 = 67,20 Ah;

- d) Máxima profundidade de descarga diária: 20 %;
  - e) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga diária (valor de 5b dividido por 6d):  $16,80 \text{ Ah} / 0,2 = 84,00 \text{ Ah}$ ;
  - f) Percentual de capacidade em fim de vida: 80 %;
  - g) Capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim de vida (valor de 6a dividido por 6f):  
 $33,60 \text{ Ah} / 0,8 = 42,00 \text{ Ah}$ ;
  - h) Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga: maior valor dos calculados em 6c, 6e e 6g =  $84,00 \text{ Ah}$ ;
  - i) Temperatura média de operação da bateria:  $20,00 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura média anual considerada no ambiente em que vai se situar o banco de baterias, que no caso estará disposta no sótão da residência);
  - j) Fator de correção da capacidade associado à temperatura: 1,05 (conforme Tabela 1 do item 5.3.3.2 da NBR 14298);
  - k) Capacidade ajustada para a temperatura média de operação (valor de 6h multiplicado pelo valor de 6j):  
 $84,00 \text{ Ah} \times 1,05 = 88,20 \text{ Ah}$ ;
  - l) Fator de segurança: 10 % (valor mínimo conforme subitem 5.3.3.3 – NBR 14298);
  - m) Capacidade ajustada em função do fator de segurança (valor de 6k vezes 6l):  $88,20 \text{ Ah} \times 1,1 = 97,02 \text{ Ah}$ .
- 7) Tempo de descarga operacional (6m dividido por 5c):  
 $97,02 \text{ Ah} / 6,00 \text{ A} = 16,17 \text{ h}$ .
- 8) Faixa de tensão de operação do sistema:
- a) Tensão mínima ajustada, que o ponto de atuação do sensor de tensão mínima para desconexão do consumidor: 11 V (Tensão mínima de desconexão (LVD) do controlador de carga, conforme Tabela 63 do ANEXO H);

- b) Tensão máxima ajustada, que é o ponto de atuação do sensor de tensão máxima de carga: 14,8 V (Tensão máxima de carga do controlador de carga, conforme Tabela 63 do ANEXO H).

9) Número de baterias em série:

- a) Tensão máxima de carga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionado: 14,8 V (conforme Tabela 60 do ANEXO G limitado por 8b);
- b) Número máximo de baterias em série (valor de 8b dividido por 9a, considerar o valor inteiro):  $14,8 \text{ V} / 14,8 \text{ V} = 1$ ;
- c) Tensão final de descarga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionada: 10,5 V (conforme Tabela 60 do ANEXO G);
- d) Tensão final de descarga calculada por bateria (8a dividido por 9b):  $11 \text{ V} / 1 = 11 \text{ V}$ ;
- e) Decrementar o número de baterias: não aplicado;
- f) Tensão de carga calculada por bateria: não aplicado;
- g) Preencher o número selecionado de baterias em série, mais apropriado: 1.

10) Seleção da bateria:

- a) Selecionar no catálogo da fabricante a bateria de capacidade menor ou igual à calculada: 105 Ah;
- b) Número de conjuntos (baterias em série) ligados em paralelo (6m dividido por 10a, considerar a parte inteira mais um):  $(97,02 \text{ Ah} / 105 \text{ Ah}) + 1 = 1$ ;
- c) Capacidade final do banco de baterias (10a vezes 10b):  
 $1 \times 105 \text{ Ah} = 105 \text{ Ah}$ .

11) Considerações finais:

- a) Máxima corrente de carga recomendada para a bateria após atingida a tensão de gaseificação: Não disponível no catálogo do fabricante;

- b) Corrente máxima gerada pelo arranjo fotovoltaico: 5,28 A (conforme corrente em potência máxima vezes 2 (2 painéis em paralelo) da Tabela 61 do ANEXO H);
- c) Temperatura de congelamento do eletrólito referenciado à máxima profundidade de descarga admitida: vide Figura 100 do ANEXO G;
- d) Auto-descarga da bateria: vide Figura 101 do ANEXO G.

12) Itens verificados:

- a) Sobrecarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- b) Subcarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- c) Congelamento do eletrólito: Não aplicável. Ocorre apenas para ambientes com temperatura abaixo de zero graus Celsius;
- d) Auto-descarga: caso haja defeito no controlador de carga.

13) Resumo das especificações da bateria selecionada:

- a) Tipo de bateria: Chumbo-ácido estacionária;
- b) Fabricante: Freedom;
- c) Capacidade nominal: 105 Ah em 20 h;
- d) Tensão nominal por bateria: 12 V;

Composição do acumulador:

- e) Quantidade de baterias em série: 1;
- f) Quantidade de baterias em paralelo: 1;
- g) Capacidade total: 105 Ah em 20 h;
- h) Tensão nominal: 12 V;
- i) Tensão máxima de carga: 14,8 V;
- j) Tensão final de descarga: 11 V.

Novamente tendo em vista uma queda de tensão máxima de 4 %, é possível se obter a seção dos cabos do lado CC por meio da equação 45.

$$S_{cond} = \left( \frac{2.11.0,0178}{V.\Delta V} \right) \quad (45)$$

Onde:

$l$  = comprimento do condutor [m];

$P$  = potência total do circuito;

$V$  = tensão do barramento CC [V];

$S_{cond}$  = área da seção do condutor [mm<sup>2</sup>].

Os equipamentos do sistema fotovoltaico, tais como: painel fotovoltaico, bateria, controlador de carga e inversor, foram postos próximos uns aos outros. Desta forma, as distâncias aproximadas entre os componentes são as seguintes:

- Painel fotovoltaico/Controlador de carga – 4 m;
- Controlador de carga/Bateria – 0,5 m;
- Controlador de carga/Inversor – 0,5 m;
- Comprimento total dos cabos em CC – 5m

Respeitando a queda de tensão máxima de 4 %, foi obtida a área da seção do condutor necessária pela equação 46.

$$S_{cond} = \left( \frac{2.5.6.0.0.0178}{12.0,04} \right) = 2,225 \text{ mm}^2 \quad (46)$$

O valor da área mínima necessária foi de  $S_{cond} = 2,225 \text{ mm}^2$ . Portanto, o valor comercial encontrado acima do calculado foi de  $S_{cond} = 2,5 \text{ mm}^2$ .

Para o lado CA, como se trata de carga de iluminação, de acordo com a norma ABNT NBR 5410, a bitola mínima é de  $S = 1,5 \text{ mm}^2$ .

### 3.4.3.2 Roteiro para o dimensionamento do banco de baterias (NBR 14298) – Sistema de iluminação LED

- 1) Nome e descrição do projeto: Protótipos do sistema fotovoltaico de iluminação residencial LED.

- 2) Tensão nominal do sistema: 12 V.
- 3) Período de autonomia: 2 dias (autonomia mínima – subitem 5.1.1.3 – NBR 14298).
- 4) Dados dos consumidores:

Tabela 29 - Sistema com ciclo de operação até 24 h – Sistema de iluminação LED.

Consumidor	Faixa de Tensão (1)		Corrente de operação [A]	Tempo de operação [h/dia] (2)	Ampères-horas diários [Ah/dia]**
	Tensão mínima [V]	Tensão máxima [V]			
Lâmpadas LED	10,00~10,75	15,00	5,167	2,8	14,4676

Fonte: Autoria própria.

**Nota:**

- (1) a queda de tensão nos cabos que interligam o inversor ao controlador de carga e a bateria foi desconsiderada por estarem muito próximos. No entanto, devido a necessidade de um sistema de monitoramento para o sistema fotovoltaico, foi inserido no circuito um resistor “*shunt*” (sistema de monitoramento que será descrito a seguir) com a função de monitorar a corrente circulante nos cabos que levam ao inversor e, como há uma queda de tensão nesses componentes, foi levada em conta sua queda máxima, no valor de 0,750 V, nos cálculos.
- (2) tempo de operação estimado visto na Tabela 17.

- 5) Resumo dos dados dos consumidores:
  - a) Corrente de operação máxima: 5,167 A;
  - b) Consumo total diário: 14,47 Ah/dia;
  - c) Maior dos valores de corrente de operação: 5,167 A;
  - d) Menor valor de tensão máxima: 15,00 V;
  - e) Maior valor de tensão mínima: 10,75 V;

## 6) Capacidade do banco de baterias

- a) Capacidade preliminar não ajustada (autonomia vezes item 5b):  
 $2 \text{ dias} \times 14,47 \text{ Ah/dia} = 28,94 \text{ Ah};$
- b) Máxima profundidade de descarga admitida: 50 %;
- c) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga (valor de 6a dividido por 6b):  $28,94 \text{ Ah}/0,5 = 57,87 \text{ Ah}$
- d) Máxima profundidade de descarga diária: 20 %;
- e) Capacidade ajustada em função da máxima profundidade de descarga diária (valor de 5b dividido por 6d):  $14,47 \text{ Ah}/0,2 = 72,34 \text{ Ah};$
- f) Percentual de capacidade em fim de vida: 80 %;
- g) Capacidade ajustada em função do percentual da capacidade em fim de vida (valor de 6a dividido por 6f):  $28,94 \text{ Ah}/0,8 = 36,17 \text{ Ah};$
- h) Capacidade ajustada em função da profundidade de descarga: maior valor dos calculados em 6c, 6e e 6g = 72,34 Ah;
- i) Temperatura média de operação da bateria: 20,00 °C (temperatura média anual considerada no ambiente em que vai se situar o banco de baterias, que no caso estará disposta no sótão da residência);
- j) Fator de correção da capacidade associado à temperatura: 1,05 (conforme Tabela 1 do subitem 5.3.3.2 da NBR 14298);
- k) Capacidade ajustada para a temperatura média de operação (valor de 6h multiplicado pelo valor de 6j):  $72,34 \text{ Ah} \times 1,05 = 75,95 \text{ Ah};$
- l) Fator de segurança: 10 % (valor mínimo conforme subitem 5.3.3.3 – NBR 14298);
- m) Capacidade ajustada em função do fator de segurança (valor de 6k vezes 6l):  $75,95 \text{ Ah} \times 1,1 = 83,55 \text{ Ah}.$

## 7) Tempo de descarga operacional (6m dividido por 5c):

$$83,55 \text{ Ah}/5,167 \text{ A} = 16,17 \text{ h}.$$

## 8) Faixa de tensão de operação do sistema:

- a) Tensão mínima ajustada, que o ponto de atuação do sensor de tensão mínima para desconexão do consumidor: 11 V (Tensão mínima de desconexão (LVD) do controlador de carga, conforme Tabela 63 do ANEXO H);
- b) Tensão máxima ajustada, que é o ponto de atuação do sensor de tensão máxima de carga: 14,8 V (Tensão máxima de carga do controlador de carga, conforme Tabela 63 do ANEXO H).

## 9) Número de baterias em série:

- a) Tensão máxima de carga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionado: 14,8 V (conforme Tabela 60 do ANEXO G limitado por 8b);
- b) Número máximo de baterias em série (valor de 8b dividido por 9a, considerar o valor inteiro):  $14,8 \text{ V} / 14,8 \text{ V} = 1$ ;
- c) Tensão final de descarga por bateria, recomendado para o tipo de bateria selecionada: 10,5 V (conforme Tabela 60 do ANEXO G);
- d) Tensão final de descarga calculada por bateria (8a dividido por 9b):  $11 \text{ V} / 1 = 11 \text{ V}$ ;
- e) Decrementar o número de baterias: não aplicado;
- f) Tensão de carga calculada por bateria: não aplicado;
- g) Preencher o número selecionado de baterias em série, mais apropriado: 1.

## 10) Seleção da bateria:

- a) Selecionar no catálogo da fabricante a bateria de capacidade menor ou igual à calculada: 105 Ah;
- b) Número de conjuntos (baterias em série) ligados em paralelo (6m dividido por 10a, considerar a parte inteira mais um):  $(83,55 \text{ Ah} / 105 \text{ Ah}) + 1 = 1$ ;
- c) Capacidade final do banco de baterias (10a vezes 10b):  
 $1 \times 105 \text{ Ah} = 105 \text{ Ah}$ .

## 11) Considerações finais:

- a) Máxima corrente de carga recomendada para a bateria após atingida a tensão de gaseificação: Não disponível no catálogo do fabricante;
- b) Corrente máxima gerada pelo arranjo fotovoltaico: 5,28 A (conforme corrente em potência máxima vezes 2 (2 painéis em paralelo) da Tabela 61 do ANEXO H);
- c) Temperatura de congelamento do eletrólito referenciado à máxima profundidade de descarga admitida: vide Figura 100 do ANEXO G;
- d) Auto-descarga da bateria: vide Figura 101 do ANEXO G.

## 12) Itens verificados:

- a) Sobrecarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- b) Subcarga: caso haja defeito no controlador de carga;
- c) Congelamento do eletrólito: Não aplicável. Ocorre apenas para ambientes com temperatura abaixo de zero graus Celsius;
- d) Auto-descarga: caso haja defeito no controlador de carga.

## 13) Resumo das especificações da bateria selecionada:

- a) Tipo de bateria: Chumbo-ácido estacionária;
- b) Fabricante: Freedom;
- c) Capacidade nominal: 105 Ah em 20 h;
- d) Tensão nominal por bateria: 12 V;

## Composição do acumulador:

- e) Quantidade de baterias em série: 1;
- f) Quantidade de baterias em paralelo: 1;
- g) Capacidade total: 105 Ah em 20 h;
- h) Tensão nominal: 12 V;
- i) Tensão máxima de carga: 14,8 V;
- j) Tensão final de descarga: 11 V.

Novamente tendo em vista uma queda de tensão máxima de 4 %, é possível se obter a seção dos cabos do lado CC por meio da equação 47.

$$S_{cond} = \left( \frac{2.1.1.0,0178}{V.\Delta V} \right) \quad (47)$$

Onde:

$l$  = comprimento do condutor [m];

$P$  = potência total do circuito;

$V$  = tensão do barramento CC [V];

$S_{cond}$  = área da seção do condutor [mm<sup>2</sup>].

Os equipamentos do sistema fotovoltaico, tais como: painel fotovoltaico, bateria, controlador de carga e inversor, foram postos próximos uns aos outros. Desta forma, as distâncias aproximadas entre os componentes são as seguintes:

- Painel fotovoltaico/Controlador de carga – 4 m;
- Controlador de carga/Bateria – 0,5 m;
- Controlador de carga/Inversor – 0,5 m;
- Comprimento total dos cabos em CC – 5m

Respeitando uma queda de tensão máxima de 4 %, foi obtida a área da seção do condutor necessária pela equação 48.

$$S_{cond} = \left( \frac{2.5.5,167.0,0178}{12.0,04} \right) = 1,92 \text{ mm}^2 \quad (48)$$

O valor da área mínima necessária foi de  $S_{cond} = 1,92 \text{ mm}^2$ . Portanto, o valor comercial encontrado acima do calculado foi de  $S_{cond} = 2,5 \text{ mm}^2$ .

Para o lado CA, como se trata de carga de iluminação, de acordo com a norma ABNT NBR 5410, a bitola mínima é de  $S = 1,5 \text{ mm}^2$ .

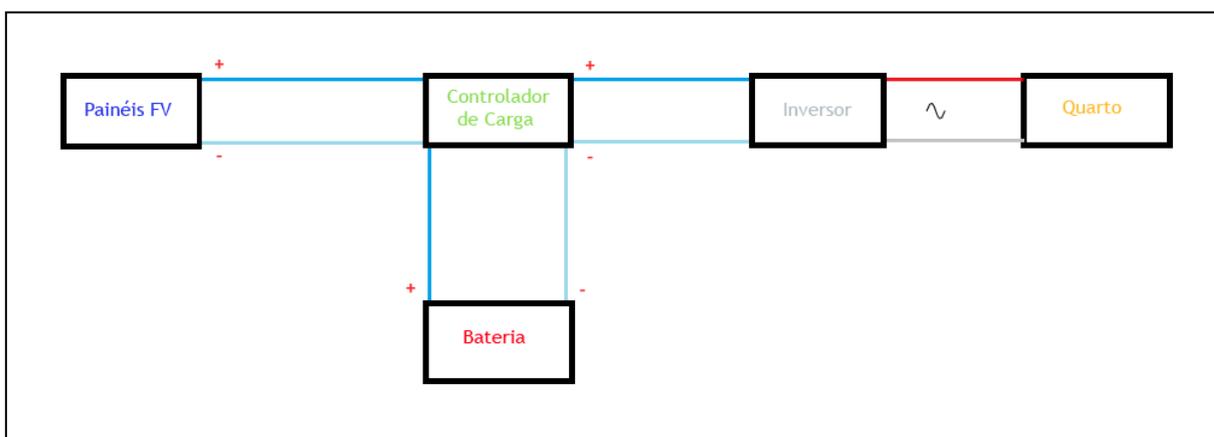
Os valores finais dos dimensionamentos feitos para os dois sistemas de iluminação estão dispostos na Tabela 30, neles é visto que, embora os valores para as capacidades ajustadas não tenham sido os mesmos, ambos os dimensionamentos tiveram como resultado a mesma bateria. Desta forma, é possível o uso dos mesmos equipamentos para ambos os protótipos sem prejudicar sua comparação.

Tabela 30 - Resumo comparativo dos dimensionamentos da bateria do protótipo - LED e fluorescente.

<b>Especificação</b>	<b>Fluorescente</b>	<b>LED</b>
Tensão nominal do sistema [V]	12	12
Período de autonomia [dias]	2	2
Tempo de utilização [h]	2,8	2,8
Corrente de operação máxima [A]	6,00	5,167
Consumo total diário [Ah]	16,80	14,47
Maior dos valores de corrente de operação [A]	6,00	5,167
Menor valor de tensão máxima [V]	15,00	15,00
Maior valor de tensão mínima [V]	10,75	10,75
Tipo de elemento	Chumbo-ácido	Chumbo-ácido
Fabricante	Freedom	Freedom
Modelo	DF2000	DF2000
Capacidade nominal por bateria (C <sub>20</sub> ) [Ah]	105	105
Tensão nominal por bateria [V]	12	12
Quantidade de baterias em série	1	1
Quantidade de baterias em paralelo	1	1
Capacidade total [Ah]	105	105
Tensão nominal [V]	12	12
Tensão máxima de carga [V]	14,8	14,8
Tensão final de descarga [V]	11	11

**Fonte: Autoria própria.**

O circuito final do sistema fotovoltaico para ambas os circuitos de iluminação fluorescente e LED do protótipo é visto na Figura 47. Uma visão dos equipamentos montados para o ensaio é apresentada na Figura 84 do APÊNDICE A.



**Figura 47 - Circuito final do sistema fotovoltaico para os circuitos de iluminação fluorescente e LED do protótipo.**

Fonte: Autoria própria.

#### 3.4.4 Método de Medição das Iluminâncias

O modo pelo qual foram verificadas as iluminâncias do ambiente de ensaio teve como base a norma NBR 5382 – Verificação de iluminância de interiores – Método de ensaio. A norma supracitada “fixa o modo pelo qual se faz a verificação da iluminância de interiores de áreas retangulares, através da iluminância média sobre um plano horizontal, proveniente da iluminação geral” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985).

O método de verificação que melhor se adapta ao ambiente em estudo consta no item 4.2 - Área regular com luminária central. Nesse item é descrito o método da seguinte forma: “Fazer leituras nos lugares p1, p2, p3 e p4. Calcular a média aritmética dos quatro lugares, que é a iluminância média da área.” Sendo os lugares p1, p2, p3 e p4 ilustrados na Figura 48.

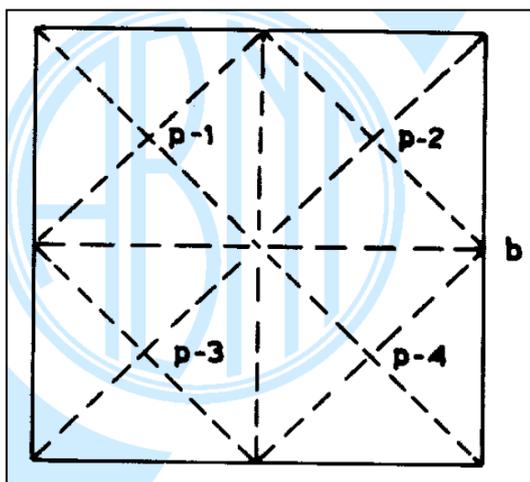
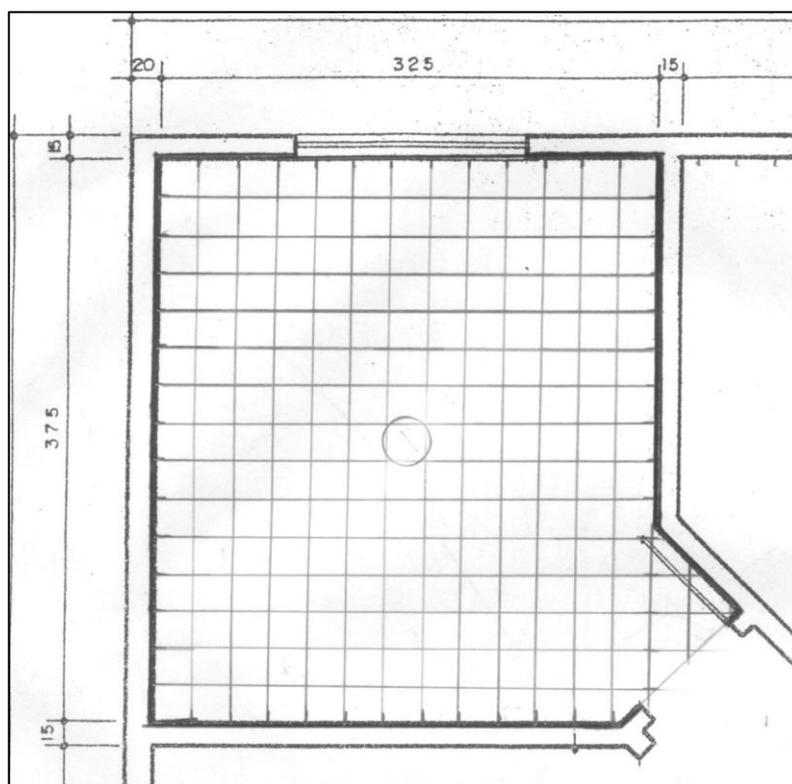


Figura 48 - Área regular com luminária central.  
Fonte: NBR 5382 (1985).

A utilização desse método, bem como os demais métodos descritos na norma citada, conforme o item 4 da norma, “resultará em valores de iluminância média com no máximo 10 % de erro sobre os valores que seriam obtidos pela divisão da área total em áreas de (50 x 50) cm, fazendo-se uma medição em cada área e calculando-se a média aritmética” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985).

No entanto, como o interesse do ensaio está na comparação entre os tipos de iluminação fluorescente e LED, e como conhecido que um dos maiores fatores negativos da iluminação LED consiste em seu baixo espalhamento de luz, desta forma, geralmente não sendo usada como substituta para as lâmpadas fluorescentes e incandescentes, se viu a necessidade de um meio de verificação mais preciso que evidenciasse esse fator de forma mais clara. E juntamente com o fato do ambiente não ser completamente regular, como destaca a norma NBR 5382, foi usado um método mais adequado para o objetivo pretendido.

O método usado consistiu na divisão da área total do cômodo em estudo em áreas de (25 x 25) cm ilustrada na Figura 49. Essa dimensão foi usada pela maior facilidade de adaptar o cômodo, de dimensões (325 x 375) cm, para tal medida em vez de áreas de (50 x 50) cm, que servem de referência na norma NBR 5382.



**Figura 49 - Planta baixa do quarto – ambiente de realização do ensaio - com as divisões em áreas de (25 x 25) cm.  
Fonte: Autoria própria.**

O aparelho usado para a medição das iluminâncias foi um luxímetro digital com correção de cosseno (conforme Tabela 65 do ANEXO H). Antes do início das leituras o aparelho foi exposto a iluminância do ambiente de ensaio durante cerca de 5 minutos para sua estabilização, conforme a norma NBR 5382.

As medições foram realizadas no plano horizontal, sobre mesas construídas com 80 cm de altura do piso conforme item 3.4 da norma NBR 5382. As imagens de como foi feita a medição são vistas na Figura 79 e Figura 80 do APÊNDICE A.

#### 3.4.5 Monitoramento do sistema fotovoltaico

Com a construção dos protótipos alimentando diferentes cargas em épocas distintas do ano, a fim de viabilizar a comparação dos sistemas fotovoltaicos, veio a necessidade um sistema que permitisse o monitoramento do sistema fotovoltaico.

O sistema de monitoramento desenvolvido teve como base 3 elementos principais: um mecanismo eletrônico de coleta de dados e comutação, um

microcontrolador com leitura analógica e saídas digitais, e um *software* computacional que possibilitasse o controle do sistema e o armazenamento dos dados coletados.

O *software* utilizado foi o LabView, nele foi desenvolvido um programa que permitisse além do armazenamento dos dados, sua ordenação lógica, agrupando os dados de maneira a facilitar o entendimento e a análise, bem como o controle do sistema fotovoltaico de maneira remota.

O microcontrolador usado foi o Atmel ATmega328 utilizado na plataforma de prototipagem Arduino Uno (Figura 85b do APÊNDICE A). A escolha desta plataforma se deu pela facilidade da comunicação com o *software* LabView, onde já existe um protocolo de comunicação que facilita o desenvolvimento do programa de monitoramento e a comunicação é feita por meio de cabo USB.

O mecanismo eletrônico de coleta de dados foi desenvolvido com base em amplificadores operacionais diferenciadores. Pelos quais foi obtida a tensão de resistores “*shunt*”, para a medição das correntes, e divisores resistivos para a medição das tensões. Enquanto que o mecanismo de comutação foi constituído de transistores e relés, que possuem a função de ligar e desligar as lâmpadas e também de comutar as entradas dos amplificadores de forma a mudar o ponto de leitura.

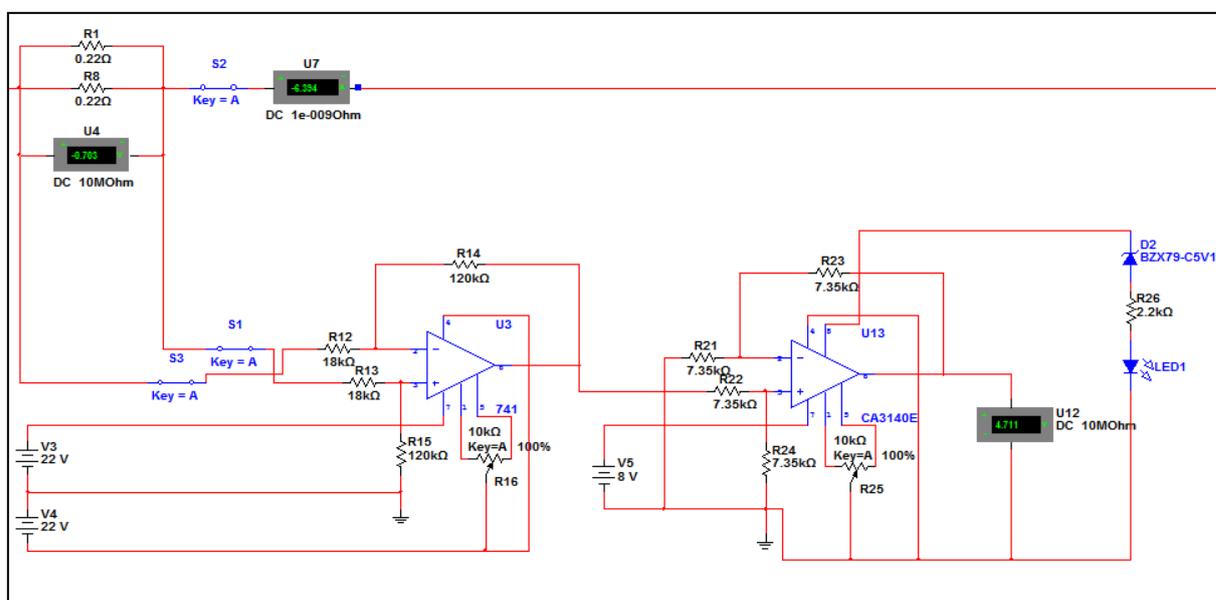
O mecanismo de coleta de dados e comutação foi constituído dos seguintes componentes: 3 placas de coleta dos dados de corrente e tensão, fonte de alimentação ligada a rede, placa de resistores “*shunt*” e divisores resistivos de tensão e placa de reles comutadores (Figura 86 do APÊNDICE A).

Para permitir a medição dos valores de tensão e corrente dos equipamentos constituintes do sistema fotovoltaico foram usados divisores resistivos e resistores “*shunt*”, respectivamente. Desta forma, por meio da leitura da tensão nos resistores “*shunt*” e nos divisores de tensão pôde ser calculado o verdadeiro valor de cada uma das grandezas.

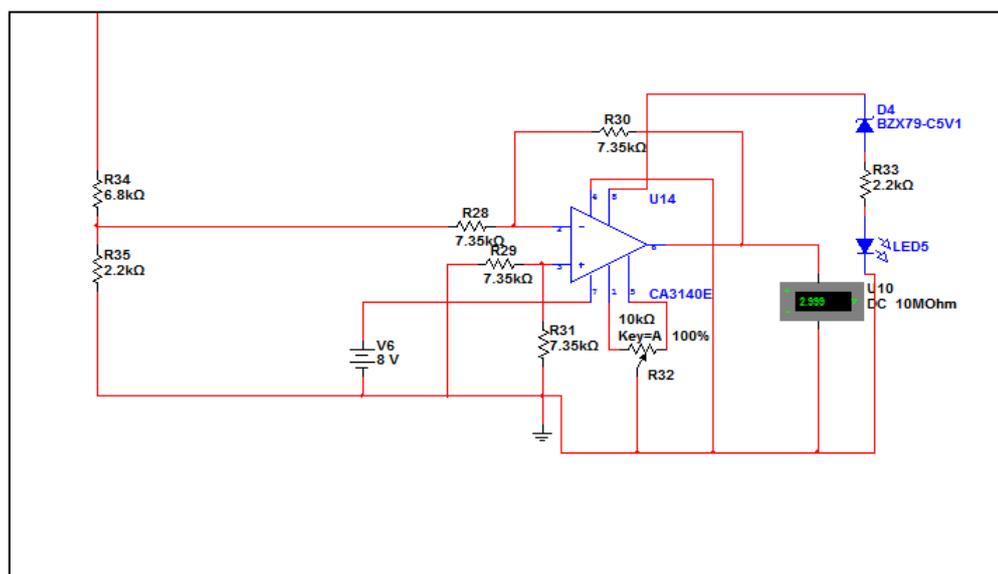
A medição da corrente foi feita com o uso de dois amplificadores operacionais com a função de diferenciadores. O primeiro amplificador tendo a função de amplificador diferenciador, desta maneira fazendo a leitura da diferença de potencial no resistor “*shunt*” tendo como resposta na saída um valor de tensão correspondente a essa diferença, mas agora com a referência no potencial zero e

com um valor maior a fim de facilitar a leitura por parte da porta analógica do microcontrolador. O segundo diferencial teve a função de proteger o microcontrolador, tendo em vista que as portas analógicas dele suportam uma tensão até 5 V, assim sendo necessário um limitador da tensão de saída independentemente da tensão na entrada do amplificador para que essas portas não sejam danificadas. O circuito final para a medição dos valores de corrente pode ser visto na Figura 50.

Para a medição da tensão, foi usado apenas um amplificador operacional idêntico ao segundo amplificador do medidor de corrente, também com a função de proteção do microcontrolador visto na Figura 51.



**Figura 50 - Circuito de leitura de corrente.**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 51 - Circuito de leitura de tensão.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A tensão e corrente foi medida em todas as ligações em CC do sistema fotovoltaico. Assim, foram colocados resistores *shunt*, na ligação: do painel fotovoltaico com o controlador de carga; do controlador de carga com a bateria e do controlador de carga com o inversor. Enquanto que os divisores de tensão foram postos juntos aos equipamentos: painel fotovoltaico, bateria e inversor.

A medição da corrente e tensão na saída do inversor não foi possível devido, principalmente, a dificuldade em ler corretamente a forma de onda da tensão e da corrente, pois a leitura no *software* depende do processamento do computador usado e foi visto que, com todo o programa desenvolvido em funcionamento, a taxa de coleta de dados era insuficiente para a correta leitura desses valores, considerando estarem em CA.

Desta forma foram montados 3 leitores de corrente e 3 leitores de tensão que podem ser visto na Figura 85a do APÊNDICE A.

No entanto foi necessária ainda a leitura da iluminância do céu para que fosse possível o entendimento do comportamento do sistema e a comparação dos dias. Assim se fez necessário um circuito de comutação para alternar a leitura das portas analógicas, tendo em vista a existência de apenas 6 portas analógicas. Desta maneira o circuito de comutação alternava entre a iluminância celestial e a tensão do inversor, pois o funcionamento das lâmpadas se dava a noite, quando não havia luz solar.

Os circuitos de comutação foram feitos com relés que eram acionados pelos sinais digitais do microcontrolador. Quando ativado por meio do programa desenvolvido o microcontrolador envia um sinal 1 de suas portas digitais que é amplificado por transistor e então chega até os relés, os acionando. Foi usado outro circuito deste tipo para ligar e desligar as lâmpadas.

O circuito comutador foi necessário ainda para a comutação das correntes de carga da bateria e do inversor, pelo mesmo motivo de não operarem ao mesmo tempo. A carga a bateria só acontece no período do dia e o inversor só entra em operação a noite, ao ligar as lâmpadas. Esta comutação é devida a corrente na bateria não ter sempre o mesmo sentido, pois quando esta em carga a corrente flui no sentido do terminal positivo, enquanto que quando esta suprindo uma carga ela flui no sentido oposto e em função da construção dos leitores de corrente, a inversão no sentido não é possível, tendo como resultado um valor nulo nestes casos.

Pelo sistema de monitoramento desenvolvido no programa LabView foi possível ter um noção das correntes e tensões do sistema, bem como da iluminância do céu, por meio de gráficos e também com indicadores numéricos.

Os dados foram salvos com um intervalo de cerca de sete segundos em um arquivo no formato \*.txt. Esse intervalo de tempo é influenciado pelo processamento do computador. Portanto, conforme o uso do computador esse intervalo de tempo aumentou ou diminuiu.

O início da operação das lâmpadas e o tempo de duração em segundos do ensaio são indicados ao início do programa, sendo estipulados pelo operador. Sendo que para se ter as 2h48min diárias (2,8 horas), são necessários 10080 segundos.

Uma visão geral da interface do programa é vista na Figura 87 do APÊNDICE A.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 COMPARAÇÃO DOS PROJETOS LUMINOTÉCNICOS TEÓRICOS

Com a realização do projeto luminotécnico teórico para cada sistema de iluminação, se tornou possível a comparação das duas tecnologias estudadas. Para se ter uma visão correta dos sistemas, se fez necessária a comparação da potência instalada, da densidade de potência e da densidade de potência relativa.

A comparação da potência instalada serve apenas para fins energéticos da residência e leva em conta todas as suas características e limitações servindo apenas para este projeto em específico. Portanto não é um parâmetro que permite uma real comparação das lâmpadas, mas sim dos projetos luminotécnicos desta residência e teve papel primordial para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Para uma melhor visualização da potência, a densidade de potência acaba sendo um parâmetro mais válido, pois delimita a potência pelo metro quadrado, ou seja, ela permite que se tenha um noção da quantidade de potência necessária para se iluminar um metro quadrado de plano de trabalho do ambiente conforme as necessidades de iluminância que lhe foram especificadas. Contudo, existem diferentes iluminâncias para cada ambiente e fluxos luminosos para cada lâmpada, e usando apenas o parâmetro da densidade de potência, a iluminância, e conseqüentemente o fluxo luminoso incidente no plano de trabalho, ainda não são ponderados no cálculo. Como solução, existe a densidade de potência relativa, que indica a densidade de potência necessária para 100 lux de iluminância, que, em outras palavras, mostra a quantidade de potência por metro quadrado necessária para que se tenha 100 lux para esta área.

Os valores da potência instalada e quantidade de lâmpadas para as duas tecnologias de iluminação estão dispostos na Tabela 31.

Em relação as lâmpadas usadas, foram escolhidas lâmpadas que estivessem dentro dos parâmetros luminotécnicos: temperatura de cor e índice de reprodução de cor (IRC). Contudo, não foi encontrado um modelo de lâmpada LED com IRC > 80 para os modelos com temperatura de cor de 6500K.

Tabela 31 - Potência de iluminação instalada para as duas tecnologias.

Cômodo	Fluorescentes		LED		Redução da potência instalada com o uso da tecnologia LED [%]
	Quantidade de lâmpadas	Potencia instalada [W]	Quantidade de lâmpadas	Potencia instalada [W]	
<b>Pavimento térreo</b>					
Sala de Jantar	2	84	6	75	10,71
Sala de Estar	8	112	8	100	10,71
Cozinha	2	70,4	2	44	37,50
Circulação	2	22	2	25	-13,64
Banheiro	2	36	4	36	0,00
Lavanderia	2	70,4	4	88	-25,00
Escritório	6	211,2	8	176	16,67
Garagem	4	140,8	4	88	37,50
Proj. Sacada Frontal	2	28	2	25	10,71
Proj. Sacada Fundos	2	28	2	25	10,71
<b>Total do pavimento</b>	-	<b>802,8</b>	-	<b>682</b>	<b>15,05</b>
<b>Pavimento superior</b>					
Quarto 1	2	54	4	50	7,41
Quarto 2	2	84	6	75	10,71
Quarto 3	2	54	4	50	7,41
Estar Intimo	4	92	8	100	-8,70
Circulação	2	22	2	25	-13,64
Banheiro	2	40	4	36	10,00
Quarto Casal	4	108	10	125	-15,74
Sacada Frontal	4	44	4	50	-13,64
Sacada Fundos	2	28	2	25	10,71
Escada	2	22	2	25	-13,64
<b>Total do pavimento</b>	-	<b>548</b>	-	<b>561</b>	<b>-2,37</b>
<b>RESIDÊNCIA</b>	-	<b>1350,8</b>	-	<b>1243</b>	<b>7,98</b>

Fonte: Autoria própria.

Por meio da análise da Tabela 31, observa-se que realmente a potência instalada para o sistema de iluminação com as lâmpadas LED, no valor de 1243 W, foi menor que a obtida para as lâmpadas fluorescentes, no valor de 1350,8 W. A redução final na carga instalada foi de aproximadamente 7,98 %.

Para facilitar o entendimento desses valores se fez uma análise mais detalhada das potências instaladas para cada sistema, comparando por pavimento e também por cômodo.

Ao se analisar os valores de potência instalada por pavimento, repara-se que para o pavimento superior o valor da potência instalada foi levemente maior para o sistema de iluminação LED com 561 W, enquanto que o sistema de iluminação fluorescente teve um valor de 548 W, o que corresponde a um aumento de 2,37 % na carga instalada com o uso da tecnologia LED. No pavimento inferior, foi visto o contrário, a potência instalada para o sistema fluorescente foi de 802,8 W, uma potência instalada muito maior que a vista para o sistema LED, onde a potência foi de 682 W. Esta redução na carga instalada corresponde a uma redução de 15,05 %.

No entanto, esses valores de potência estão relacionados principalmente com a diversidade de modelos das lâmpadas fluorescentes. Isto é, devido a pouca oferta de lâmpadas LED, ora as lâmpadas foram superdimensionadas para os cômodos, assim tendo um fluxo luminoso final maior que o necessário, e ora foram necessárias muitas lâmpadas para conseguir o fluxo luminoso necessário. Assim como existe uma grande diversidade de lâmpadas fluorescentes se torna fácil adaptar a lâmpada conforme a necessidade do cômodo, o que não é possível com as lâmpadas LED.

Exemplos de superdimensionamento podem ser vistos nos cômodos: escada, sacada frontal e circulação do pavimento superior e; circulação no pavimento térreo. Como exemplos de cômodos com grande quantidade de lâmpadas LED para suprir o fluxo luminoso necessário: os quartos 1, 2, 3 e o de casal, o estar íntimo e o banheiro, no pavimento superior e; a sala de jantar, o banheiro, a lavanderia e o escritório no pavimento térreo.

Contudo, houve cômodos com condições mais apropriadas para a comparação das lâmpadas por apresentarem características que resultaram em lâmpadas com fluxos luminosos próximos e assim a comparação se tornou viável. Os cômodos onde ocorreu esta situação foram:

- Na sala de estar - por ter 4 pontos de luz (maior que nos demais, onde geralmente existe apenas 1 ponto de luz) existiu a necessidade de uma maior quantidade de luminárias o que acabou tendo reflexo no número de lâmpadas. Desta forma, o fluxo total necessário no cômodo foi dividido em

uma quantidade maior de lâmpadas fluorescentes o que permitiu a comparação com a lâmpada LED resultando em uma redução na potência instalada de 10,71 %.

- Nas projeções das sacadas no pavimento térreo e na sacada dos fundos no pavimento superior – nesses cômodos a necessidade de um fluxo luminoso relativamente baixo foi fundamental para que permitisse a comparação em iguais condições, mesmo havendo apenas um ponto de luz no teto. Dessa forma, o fluxo luminoso das lâmpadas necessárias, seja LED ou fluorescentes, acabou sendo igual, o que possibilitou a comparação em iguais condições. Como resultado, com o uso das lâmpadas LED ocorreu uma redução de 10,71 % na potência instalada para estes cômodos.
- na garagem – embora na garagem tenha sido necessário um superdimensionamento para as lâmpadas LED, isso também ocorreu com as lâmpadas fluorescentes. Isto ocorreu para ambos os sistemas pela necessidade de existir 2 pontos de luz no cômodo para que a luz pudesse ser melhor distribuída. Dessa forma, a comparação se deu em melhores condições e agora vemos que a redução na potência instalada foi de 37,5 %, muito maior que a vista para a sala de estar.

Um aspecto importante que fica visível nesses cômodos, é que na sala de estar, nas projeções das sacadas e na sacada dos fundos a lâmpada LED escolhida, para estar de acordo com a fluorescente do tipo compacta, foi do tipo bulbo do modelo EnduraLED A19 bulb e a redução da potência instalada foi de 10,71 % para todos esses cômodos, enquanto que para a garagem, a lâmpada escolhida foi do tipo tubular, do modelo MASTER LEDtube GA e a redução da potência instalada foi de 37,5 %. Assim, é visível que este modelo de lâmpada tubular LED apresentou uma redução de potência 3,5 vezes maior que o modelo escolhido do tipo bulbo.

Portanto, ao comparar as potências instaladas, observa-se que a comparação das lâmpadas e também das tecnologias fica prejudicada apenas com a avaliação das potências instaladas para cada sistema de iluminação. Tendo uma visão muito restrita, que tem grande dependência das características dos cômodos da residência em estudo. Desta forma, foi calculada a densidade de potência e a

densidade de potência relativa para os cômodos, bem como a redução da densidade de potência relativa com o uso da tecnologia LED. Os valores constam na Tabela 32.

Tabela 32 - Densidades de potência e de potência relativa por cômodo e suas reduções com o uso da tecnologia LED.

Cômodo	Fluorescentes		LED		Redução da densidade de potência relativa com o uso da tecnologia LED [%]
	Densidade de potência [W/m <sup>2</sup> ]	Densidade de potência relativa [W/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]	Densidade de potência [W/m <sup>2</sup> ]	Densidade de potência relativa [W/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]	
<b>Pavimento térreo</b>					
Sala de Jantar	6,89089	3,75000	6,15258	3,90625	-4,17
Sala de Estar	9,18786	4,75543	8,20345	4,24592	10,71
Cozinha	7,12551	3,54267	4,45344	2,84679	19,64
Circulação	7,71930	5,58943	8,77193	4,76372	14,77
Banheiro	10,68249	5,08130	10,68249	4,57317	10,00
Lavanderia	8,08266	3,54267	10,10333	2,84679	19,64
Escritório	16,97749	3,13390	14,14791	2,51832	19,64
Garagem	7,16904	2,80971	4,48065	2,25780	19,64
Proj. Sacada Frontal	5,26316	5,33537	4,69925	4,76372	10,71
Proj. Sacada Fundos	5,14706	5,33537	4,59559	4,76372	10,71
<b>Pavimento superior</b>					
Quarto 1	4,32692	3,85714	4,00641	3,90625	-1,27
Quarto 2	7,45342	3,75000	6,65484	3,90625	-4,17
Quarto 3	5,86957	3,85714	5,43478	3,90625	-1,27
Estar Intimo	6,80977	3,70968	7,40192	3,90625	-5,30
Circulação	6,87500	5,58943	7,81250	4,76372	14,77
Banheiro	6,99301	4,34783	6,29371	4,07609	6,25
Quarto Casal	5,49898	3,57143	6,36456	3,61690	-1,27
Sacada Frontal	5,10441	5,58943	5,80046	4,76372	14,77
Sacada Fundos	5,14706	5,33537	4,59559	4,76372	10,71
Escada	7,43243	5,58943	8,44595	4,76372	14,77
<b>RESIDÊNCIA</b>	<b>7,10</b>	<b>-</b>	<b>6,53</b>	<b>-</b>	<b>8,97</b>

Fonte: Autoria própria.

Com a análise dos valores de densidade de potência da Tabela 32 observa-se que a densidade de potência para toda residência acabou sendo de 7,10 W/m<sup>2</sup>

para as lâmpadas fluorescentes e de 6,53 W/m<sup>2</sup> para as lâmpadas LED assim, como esta relação só leva em conta a área, a redução da densidade corresponde também a 7,98 %.

No entanto os valores das densidades de potência relativas mostram resultados mais significativos para a comparação das lâmpadas.

Ao se reparar nos valores percentuais das reduções da densidade de potência relativa com o uso da tecnologia LED, para os cômodos onde foram usados modelos tubulares (cozinha, lavanderia, garagem e escritório), embora os valores da potência instalada e da densidade de potência distorçam o resultado, a lâmpada LED do modelo tubular MASTER LEDtube GA apresentou redução na densidade de potência relativa de 19,64 %, sendo este o maior valor de redução encontrado. Dessa maneira, com o uso desta lâmpada LED, para iluminar com 100 lux um metro quadrado de plano de trabalho foi reduzida a potência instalada em 19,64 % em relação à lâmpada fluorescente tubular escolhida.

Comparando os valores da redução da densidade de potência relativa com a eficiência luminosa de cada lâmpada, vistos na Tabela 33, observa-se que ambas as grandezas estão diretamente relacionadas, e independentemente da tecnologia da lâmpada a que possui uma maior eficiência luminosa apresenta uma vantagem sobre a concorrente.

Tabela 33 - Relação da eficiência luminosa com a densidade de potência relativa.

Cômodos	Eficiência luminosa [lm/W]		Redução da densidade de potência relativa com o uso da tecnologia LED [%]
	Fluorescentes	LED	
<b>Pavimento térreo</b>			
Sala de Jantar	66	64	-4,17
Sala de Estar	57	64	10,71
Cozinha	84	95	19,64
Circulação	59	64	14,77
Banheiro	60	67	10,00
Lavanderia	84	95	19,64
Escritório	84	95	19,64
Garagem	84	95	19,64
Proj. Sacada Frontal	57	64	10,71
Proj. Sacada Fundos	57	64	10,71
<b>Pavimento superior</b>			
Quarto 1	65	64	-1,27
Quarto 2	66	64	-4,17
Quarto 3	65	64	-1,27
Estar Intimo	67	64	-5,30
Circulação	59	64	14,77
Banheiro	62	67	6,25
Quarto Casal	65	64	-1,27
Sacada Frontal	59	64	14,77
Sacada Fundos	57	64	10,71
Escada	59	64	14,77

**Fonte: Autoria própria.**

## 4.2 VERIFICAÇÃO DA ILUMINÂNCIA

A análise dos dados de iluminância coletados nos ensaios dos protótipos teve como critérios:

- O cumprimento da iluminância média necessária pela norma NBR 5413;
- O espalhamento da luz para cada sistema, por meio de gráficos, do desvio padrão e da variância;
- O maior e menor valor de iluminância medido e amplitude da amostra;

- Iluminância em todo o plano de trabalho do cômodo apresentar valores de iluminância acima de 70 % da média verificada.

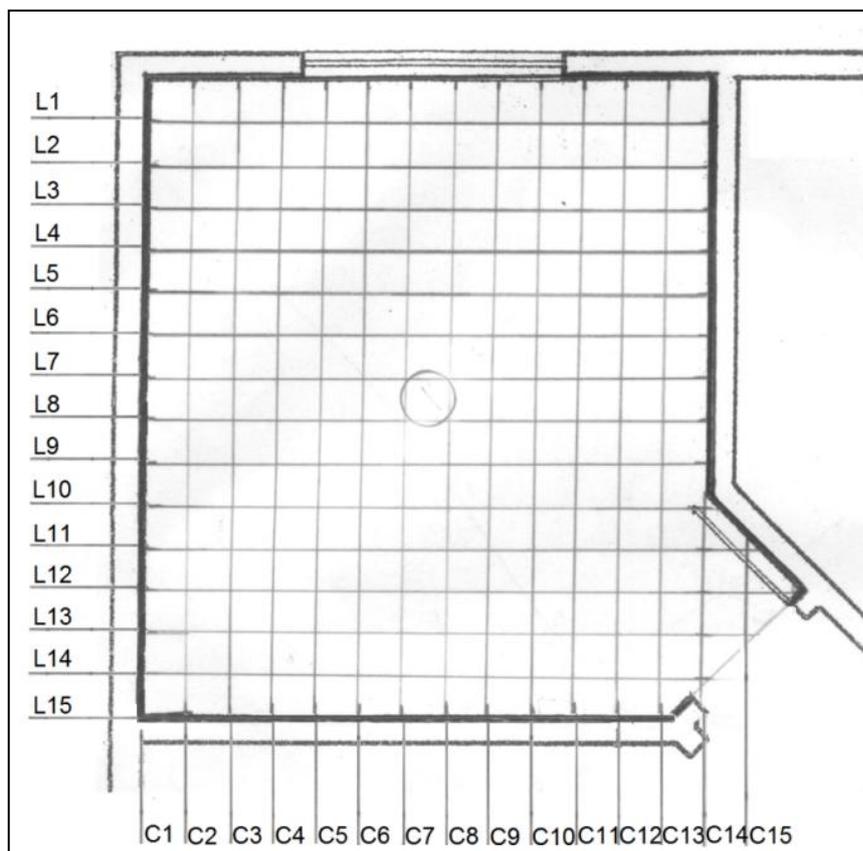
A realização das medições de iluminância no quarto 1 possibilitaram uma visualização da distribuição da luz no cômodo, bem como a intensidade da iluminância em cada ponto medido. Com o valor da média aritmética dos pontos medidos foi possível concluir se realmente foi alcançado o valor de 100 lux de iluminância média estipulado pela norma NBR 5413 – Iluminância de interiores. Ainda com os valores coletados, foi obtido o valor do desvio padrão e da variância, que auxiliam na medida da dispersão da luz no cômodo.

Depois de realizadas 10 medições de iluminância para cada sistema de iluminação, calculou-se a média aritmética das medições para cada um dos pontos medidos. Os valores médios finais para as lâmpadas fluorescentes são vistos na Figura 53 e para as lâmpadas LED na Figura 54.

Com os valores médios finais de cada um dos pontos medidos se tornou possível obter a média da iluminância medida no cômodo, que assim pôde ser comparada com a encontrada pelo uso da NBR 5413; o desvio padrão e a variância auxiliaram na constatação matemática da dispersão da iluminação para cada sistema de iluminação; o maior e o menor valor de iluminância e a amplitude dos valores medidos, que mostram os valores extremos de iluminância e auxiliam no entendimento da dispersão.

Como parâmetro final de avaliação da iluminação, foi usada a recomendação do item 4.4 da NBR 5413 onde recomenda-se que em qualquer ponto do campo de trabalho a iluminância seja igual ou superior 70 % a média determinada pela verificação das iluminâncias segundo a NBR 5382. No entanto, ambos os sistemas de iluminação tiveram pontos onde houve iluminância inferiores a essa porcentagem. Esses pontos ocorreram principalmente próximos a porta de entrada do cômodo, que além de estar em um local crítico (no canto do quarto), é escura da cor marrom, assim sua refletância é baixa e sua absorção de luz é maior. Os pontos de medição onde se observou essa situação tiveram seus valores marcados em negrito na coloração vermelha, podendo ser vistos na Figura 53 e na Figura 54.

Como já foi descrito, as iluminâncias foram medidas em áreas de 25 cm x 25 cm, distribuídas em 15 linhas e 15 colunas nomeadas de 1 a 15 conforme a Figura 52. Esta nomenclatura serve como referência espacial para os gráficos da iluminação encontrados na Figura 53, Figura 55 e Figura 57 para a iluminação fluorescente e na e na Figura 54, Figura 56 e Figura 58 para a iluminação LED.



**Figura 52 - Planta baixa do quarto com as divisões em linhas e colunas.**

**Fonte: Autoria própria.**

L1	130	139	144	143	138	134	134	136	137	139	143	139	131		
L2	141	149	154	153	151	145	144	145	149	153	153	148	140		
L3	148	158	165	167	166	165	164	164	167	167	165	158	149		
L4	156	166	175	179	183	184	182	182	183	182	178	168	155		
L5	165	177	185	193	197	197	198	199	198	195	186	176	164		
L6	171	185	196	203	207	208	209	209	209	206	195	184	171		
L7	175	190	204	213	214	212	211	213	215	213	202	191	175		
L8	178	195	207	216	219	216	213	215	218	212	202	188	172		
L9	177	194	208	217	219	220	218	218	219	212	200	188	172		
L10	174	189	202	212	219	220	221	218	217	206	194	182	170		
L11	168	185	198	208	212	215	217	213	209	199	185	170	156	135	
L12	164	181	192	200	204	207	209	204	200	190	178	160	144	127	113
L13	159	172	182	191	193	194	194	191	188	180	167	148	136	117	106
L14	149	163	173	178	182	180	179	174	175	165	156	138	124	106	99
L15	140	148	157	164	164	159	160	160	158	151	142	136	120	102	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15

**Figura 53 - Valores de iluminância no Quarto 1 - Lâmpadas fluorescentes.**

Fonte: Autoria própria.

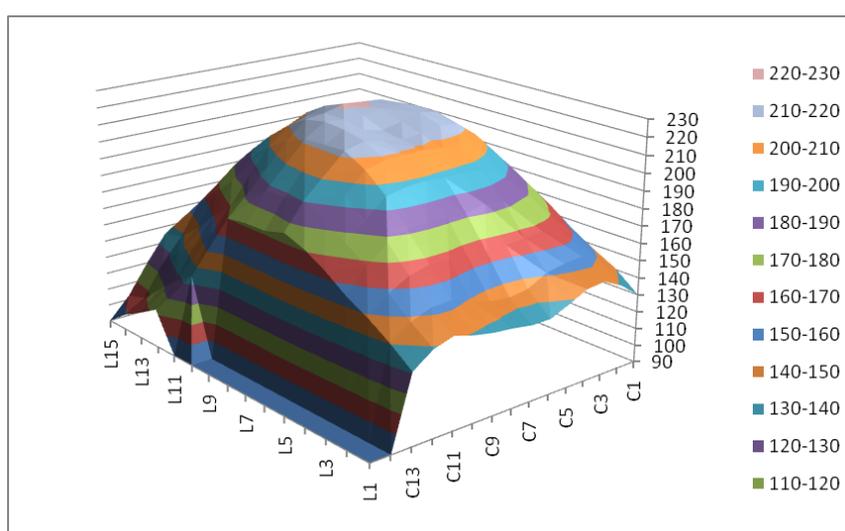
L1	129	140	147	148	140	139	139	141	137	140	143	138	131		
L2	143	151	157	160	154	151	151	153	150	152	152	148	141		
L3	151	161	168	173	172	172	173	173	170	169	164	158	149		
L4	159	172	180	188	192	196	196	193	191	186	178	167	156		
L5	168	182	194	205	211	217	219	218	212	201	190	179	167		
L6	175	192	207	220	230	241	245	240	231	218	202	188	174		
L7	181	200	217	234	247	260	265	259	247	229	212	195	179		
L8	187	207	226	244	259	272	277	270	255	236	217	197	181		
L9	184	204	222	239	256	269	271	264	252	232	211	194	178		
L10	182	199	217	231	246	257	259	253	241	223	204	188	174		
L11	176	193	208	221	232	238	242	235	225	211	195	175	159	134	
L12	170	185	199	210	218	223	224	219	211	198	182	162	148	128	113
L13	162	176	186	196	202	205	206	200	196	185	170	150	138	117	105
L14	153	166	175	182	188	190	189	183	182	172	158	139	125	107	100
L15	142	151	159	166	170	171	170	168	164	156	146	136	120	104	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15

**Figura 54 - Valores de iluminância no Quarto 1 - Lâmpadas LED.**

Fonte: Autoria própria.

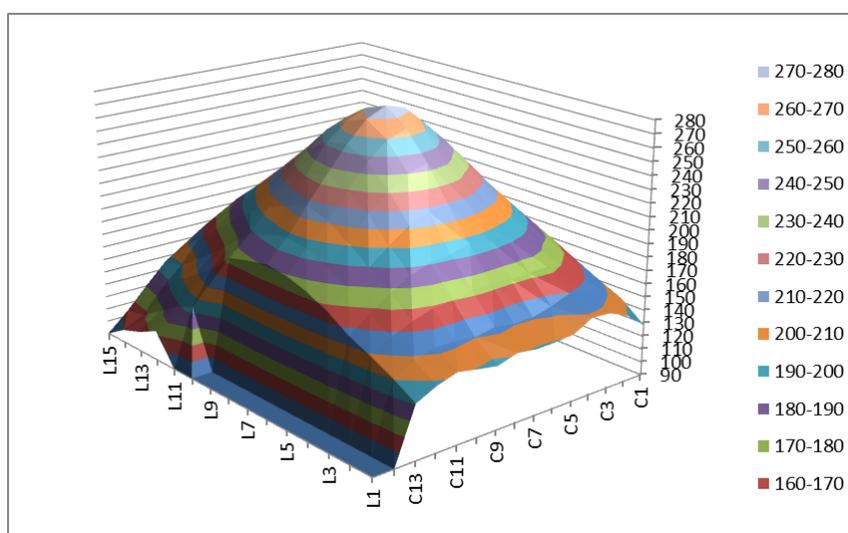
Com os valores médios das iluminâncias medidas em cada ponto, (apresentados na Figura 53 para as lâmpadas fluorescentes, e na Figura 54 para as lâmpadas LED) foram construídos os gráficos da distribuição das iluminâncias no cômodo a fim de facilitar a visualização da dispersão da luz no cômodo em duas perspectivas diferentes (visão noroeste e visão sudoeste).

Os gráficos da Figura 55 e da Figura 57 apresentam a distribuição da iluminância para as lâmpadas fluorescentes, enquanto que a Figura 56 e a Figura 58 mostram a distribuição para as lâmpadas LED.



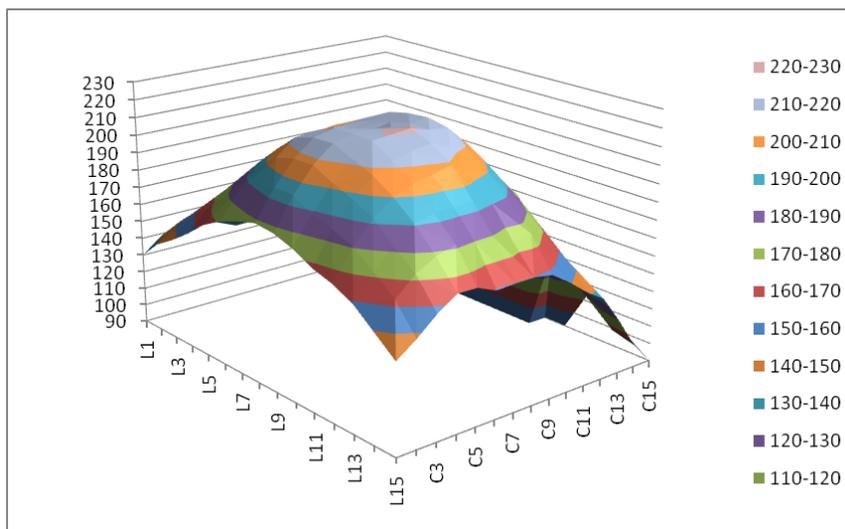
**Figura 55 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas fluorescentes - Vista nordeste.**

Fonte: Autoria própria.



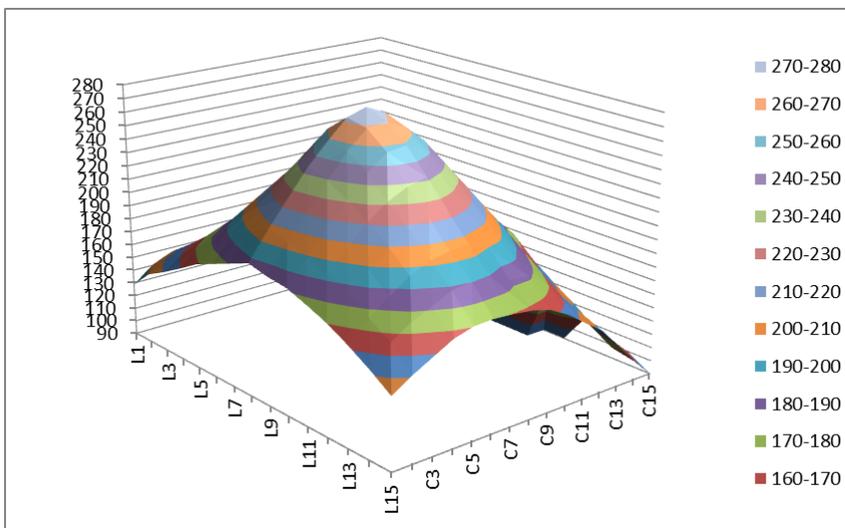
**Figura 56 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas LED - Vista nordeste.**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 57 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas fluorescentes - Vista sudoeste.**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 58 - Gráfico da distribuição das iluminâncias no quarto 1 - lâmpadas LED - Vista sudoeste.**

Fonte: Autoria própria.

Tabela 34 - Resultados da verificação da iluminância para os sistemas de iluminação.

Parâmetro	Fluorescente	LED
Média [lx]	176,822	188,040
Desvio Padrão [lx]	28,720	39,011
Variância [lx <sup>2</sup> ]	824,829	1521,890
Maior Valor [lx]	221	277
Menor Valor [lx]	99	100
Amplitude [lx]	122	177
70 % da iluminância média [lx]	123,776	131,6283

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a Tabela 34, conclui-se que ambos os sistemas de iluminação respeitaram o valor de 100 lux de iluminância média especificados pela norma para o Quarto 1 com grande margem de segurança. Pode-se reparar ainda, que a iluminância média alcançada para as lâmpadas LED (188,040 lux) e para as lâmpadas fluorescentes (176,822 lux) foi superior a calculada, no valor de 131,08 lux para as lâmpadas LED e 124,74 lux para as lâmpadas fluorescentes. Os ensaios apresentaram um valor 41,75 % e 43,45 % superior ao calculado para a lâmpada fluorescente e LED, respectivamente. Os valores acima dos esperados podem ser explicados pelas condições do cômodo, terem sido melhores que as estipuladas: coeficientes de reflexão com valores mais elevados (valores não disponíveis nas tabelas consultadas), que indicariam um maior fator de utilização. A proximidade nos valores percentuais mostra que as características reais relativas às lâmpadas e à luminária (suporte das lâmpadas), sendo elas a curva de distribuição luminosa (CDL), a eficiência do recinto e a eficiência da luminária, estiveram de acordo com o utilizado nos cálculos.

Contudo, ao comparar os gráficos da Figura 55 e da Figura 57, relativos às lâmpadas fluorescentes, com os encontrados na Figura 56 e na Figura 58, relativos as lâmpadas LED, torna-se visível o melhor espalhamento da luz para as lâmpadas fluorescentes, fato que é reforçado pelos valores do desvio padrão, 28,720 lux para a iluminação fluorescente e 39,011 lux para a iluminação LED, e da variância, 824,829 lux<sup>2</sup> para a iluminação fluorescente e 1521,890 lux<sup>2</sup> para a iluminação LED. Esses valores mostram que a dispersão dos valores das iluminâncias medidas foi maior

para a iluminação LED, indica uma variabilidade maior dos resultados das iluminâncias medidas para este caso.

A amplitude das iluminâncias medidas ajuda a visualizar esta variabilidade. A amplitude dos valores medidos para a iluminação LED (177 lux) se mostrou 45,08 % maior que a encontrada para a iluminação fluorescente (122 lux). No entanto, os valores mínimos foram muito próximos, 99 lux para a iluminação fluorescente e 100 lux para iluminação LED, o que faz com que a diferença de amplitude seja visualizada nos pontos máximos, 221 lux para a iluminação fluorescente e 277 lux para a iluminação LED. Por meio da visualização da Figura 53 da iluminação fluorescente, vemos a existência de mais de um ponto de medição onde se encontrou o valor máximo de iluminância e os valores periféricos a estes ainda são mais próximos que os encontrados a na Figura 54 da iluminação LED, onde vemos que existe apenas um ponto de máxima iluminância.

Para uma comparação mais completa, é coerente uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores calculados no projeto luminotécnico do protótipo. Como a potência e o fluxo luminoso dependem unicamente da lâmpada seus valores foram mantidos para os valores experimentais. Isto reflete em uma densidade de potência experimental também igual aos valores teóricos. No entanto, como vimos, os valores de iluminância média medidos experimentalmente não foram iguais aos valores teórico, desta forma o valor da densidade de potência relativa sofreu alterações.

Tabela 35 - Valores teóricos e experimentais da iluminação - protótipo.

Sistema de iluminação		Iluminância média alcançada [lx]	Potência instalada [w]	Densidade de potência [w/m <sup>2</sup> ]	Densidade de potência relativa [w/m <sup>2</sup> p/ 100 lx]
Fluorescente	Teórico	124,74	60	4,80769	3,85417
	Experimental	176,82	60	4,80769	2,718943
LED	Teórico	131,08	50	4,0064	3,056454
	Experimental	188,04	50	4,0064	2,130611

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 35 nos mostra os valores teóricos frente os experimentais para cada sistema de iluminação. Nela pode-se reparar que em ambos os protótipos os valores experimentais mostraram um melhor desempenho que o teórico. Para a iluminação fluorescente o valor da densidade de potência relativa experimental foi de 2,718943 W/m<sup>2</sup> para 100 lux, um valor 29,45 % menor que o calculado, no valor de 3,85417 W/m<sup>2</sup> para 100 lux. No caso do sistema de iluminação LED essa redução foi ainda maior, o valor experimental da densidade de potência relativa (2,130611 W/m<sup>2</sup> para 100 lux) foi 30,29 % menor que o valor teórico calculado, de 3,056454 W/m<sup>2</sup> para 100 lux.

Esses valores indicam que, na prática, a potência necessária para iluminar um metro quadrado de plano de trabalho do cômodo com 100 lux seria de 2,130611 W para o sistema de iluminação LED e de 2,718943 W para o sistema de iluminação fluorescente.

#### 4.3 COMPORTAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Com os dados de tensão e corrente de cada componente do sistema fotovoltaico, bem como da iluminância obtidos por meio do programa desenvolvido em LabView juntamente com o microcontrolador Arduino, foi possível construir um gráfico do comportamento diário do sistema fotovoltaico.

O período diário foi determinado entre o amanhecer do Sol, entre as 5h30min até 6h00min, e o final do dia às 23h59min. Resultando assim num intervalo de tempo diário de monitoramento de aproximadamente 18h30min.

O intervalo de tempo entre as aquisições de dados foi estipulado em 7 segundos, no entanto, esse intervalo de tempo é relacionado com o tempo de processamento do computador usado. Como este computador não é dedicado para a obtenção desses dados, esse intervalo de tempo teve grande variação no decorrer do dia tendo relação com o uso do computador para outras atividades.

Ao final de cada dia, após adquiridos os dados, foram construídos gráficos com o auxílio do programa Excel da Microsoft, pelos quais é possível ter uma noção visual do comportamento do sistema durante todo o período diário.

Para possibilitar uma análise energética do sistema, energia gerada pelo painel fotovoltaico, visualização das trocas energéticas entre os componentes e energia demandada pela carga, foram calculados os valores de energia de cada componente do sistema. No entanto, pelos intervalos de tempo não serem constantes ao longo do período de amostragem e os valores coletados pelo programa mostrarem apenas a hora e minuto da coleta, houve a necessidade de calcular a energia para cada minuto de amostragem. Para então, serem somados a fim de obter o valor energético diário.

Este procedimento foi feito por meio da contagem de amostras dentro de um minuto e multiplicação da corrente pela tensão do componente em cada amostra, obtendo a potência instantânea, que são somadas a cada interação. Assim ao final do minuto a soma total das potências instantâneas é dividida pelo número de amostras, obtendo a potência média no minuto, que então foi multiplicada por 60 s, tendo como resultado o valor da energia, em Ws, dentro de cada minuto amostrado.

Por fim, todos os valores de energia encontrados em intervalos de 60 s são somados para finalmente serem divididos por 3600 s, ou seja, 1 hora. Assim obtemos a energia total diária, em Wh, de cada componente do sistema fotovoltaico.

A equação 49 mostra uma aproximação do equacionamento descrito para a obtenção da energia diária de cada componente.

$$E = \left( \frac{1}{n_1} \sum_{n=1}^{n_1} U[n_1].I[n_1] + \frac{1}{n_2} \sum_{n=1}^{n_2} U[n_2].I[n_2] \dots \frac{1}{n_N} \sum_{n=1}^{n_N} U[n_N].I[n_N] \right) \cdot \frac{1}{60} \quad (49)$$

Onde:

$n$  = quantidade de medições dentro de cada minuto;

$N$  = quantidade de minutos ao fim do período diário;

$E$  = energia total diária do componente [Wh];

$I[n]$  = corrente instantânea da medição [A];

$U[n]$  = tensão instantânea da medição [V].

Com o uso deste procedimento tem-se um valor de energia mais preciso que o obtido apenas com o uso do intervalo de tempo médio de todo o período diário.

Conhecido o procedimento usado para a coleta podemos analisar o balanço energético dos dias.

As medições de iluminância do céu, não apresentam valores condizentes com a realidade, tendo efeito apenas comparativo. Isto se deve, a princípio, ao fato da curva de resistência do LDR (componente usado para conhecermos o comportamento do Sol) ser potencial e sua precisão não ser igual pra todos os níveis de iluminância do dia. Outro fator que invalida os valores oriundos do LDR foi sua deterioração. Ao decorrer deste projeto houve uma grande deterioração dos componentes LDR devida principalmente à radiação ultravioleta do Sol e a água da chuva. Após chuvas com grande volume de água o dano pode ser visto nos resultados de iluminância incoerentes para os dias posteriores a grandes chuvas, que juntamente com as trocas desses componentes como tentativa de solucionar o problema, invalida a comparação entre os dias. A depreciação e perda de desempenho do LDR podem ser vista nos gráficos do comportamento diário. No entanto, seus resultados ainda são válidos ao mostrar mudanças bruscas do tempo, o que ajuda a compreender os resultados obtidos dos demais componentes.

#### 4.3.1 Comportamento do sistema fotovoltaico para a iluminação fluorescente

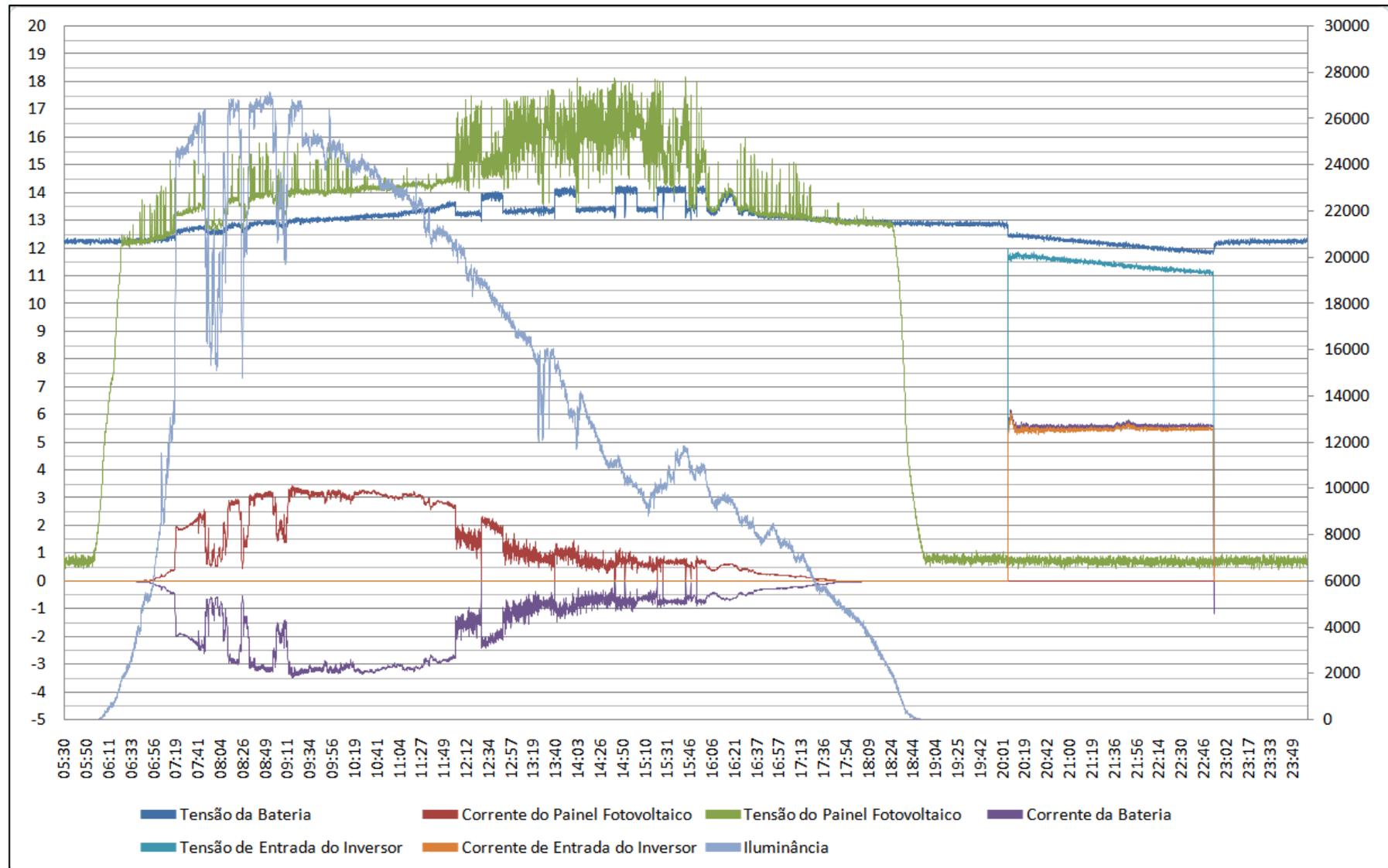
Para o ensaio com as lâmpadas fluorescentes foram coletados os dados de 4 dias seguidos de ensaio: 21° dia, 22° dia, 23° dia e 24° dia. Assim pode-se obter o comportamento do sistema ao fim de cada dia e também a influência de cada dia em seus adjacentes.

Para cada dia separadamente foi construído um gráfico do comportamento do sistema. Nesses gráficos constam os valores de corrente e tensão do painel fotovoltaico, da bateria e da entrada do inversor, bem como a iluminância celestial captada ao longo do dia.

Em todos os gráficos são encontrados os valores de corrente e tensão expressos no eixo vertical esquerdo enquanto que o eixo vertical direito expressa o valor da iluminância, lembrando que esses valores servem apenas como parâmetro de comparação entre os dias. O eixo horizontal apresenta o tempo em horas da coleta de dados.

O sinal da corrente da bateria indica o sentido da corrente na bateria. Sendo considerado positivo quando a corrente sai pelo terminal positivo, ou seja, a bateria encontra em descarga, e negativo quando a corrente entra pelo terminal positivo, ou seja, a bateria está sendo carregada.

O gráfico da Figura 59 apresenta o comportamento do 21º dia de ensaio.



**Figura 59 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 21º dia - lâmpadas fluorescentes**  
 Fonte: Autoria própria.

O 21º dia de ensaio das lâmpadas fluorescentes foi ensolarado durante o período da manhã, com momentos de tempo nublado, e nublado durante a tarde. Sendo este o melhor dia para a geração fotovoltaica analisado para as lâmpadas fluorescentes.

Na Figura 59 é visto o período de carregamento da bateria entre 6h30min às 12h00min, tendo alguns períodos de tempo nublado, estado que pode ser constatado pelos altos valores de corrente e aumento da tensão da bateria. A diferença entre as tensões do painel e da bateria durante este período se deve ao fato de haver resistores “*shunt*”, no valor de aproximadamente  $0,11 \Omega$ , para a obtenção da corrente (fato inerente ao processo de coleta de dados e comum a todos os gráficos que serão apresentados). Como entre o painel e a bateria existem dois resistores desse tipo, e como a corrente através desses componentes foi cerca de 3 A, a queda de tensão em cada um desses componente resulta em uma diferença de tensão entre a tensão do painel e a da entrada da bateria. Embora o controlador de carga esteja neste entremeio sua queda de tensão é muito baixa sendo desprezível em relação às quedas de tensão nos resistores.

Durante esse período ainda, é visível a relação direta entre a corrente do painel fotovoltaico e a iluminância incidente nos painéis, sendo vista ainda, mas com certa distorção, na tensão do painel.

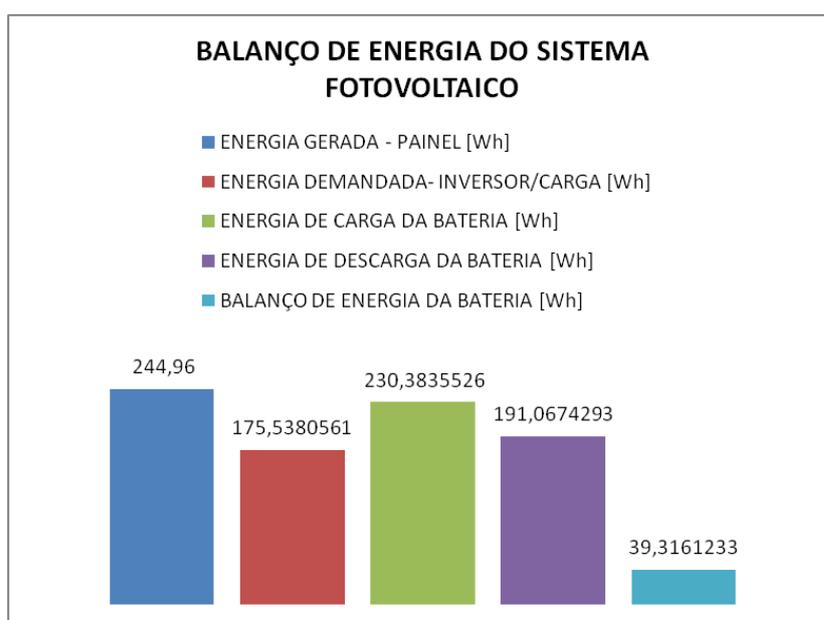
Após o período de carga da bateria o controlador de carga interrompe o carregamento da bateria que a partir das 12h00min entra em flutuação até 15h55min. Esse período é visível pelos degraus ascendentes nos valores de tensão da bateria e pelos degraus descendentes no valor da corrente de carga da bateria. Também facilita a visualização, o maior chaveamento do controlador de carga visto na aparente instabilidade e aumento da tensão do painel fotovoltaico, causado pelo fato de seus terminais estarem em aberto, e das correntes do painel e de carga da bateria, que em alguns momentos chegam a apresentar valores nulos.

Ao final do dia, das 15h55min até as 18h00min, o painel novamente supriu a carga agora com baixa potência devido à menor energia solar nos painéis.

Aproximadamente às 20h00min é iniciada a operação da carga (inversor e lâmpadas) que durou até as 22h48min. No início da operação das lâmpadas existe uma corrente demandada superior a de regime, isto é relacionado com o

aquecimento das lâmpadas, que ao serem ligadas demoram certo tempo até aquecerem e funcionarem em seu regime convencional. Durante este período é visível na Figura 59 uma queda de tensão na bateria devido à entrada em operação da carga e pode ser vista a descarga da bateria pela rampa decrescente na tensão de saída da bateria e de entrada da bateria.

Assim como para a ligação entre o painel fotovoltaico e a bateria, o que explica a diferença de tensão entre a saída da bateria e a entrada do inversor, é a necessidade de um resistor “*shunt*”, também no valor de  $0,11 \Omega$ , para a medição da corrente. No entanto, para o período de operação das lâmpadas, foi usado apenas um resistor deste tipo entre o controlador de carga e o inversor. Isto se deve ao fato que um resistor entre a bateria e o controlador de carga causa uma queda de tensão significativa para correntes acima de 5 A, demandando grande potência e causando uma grande diferença de tensão entre a saída da bateria e a entrada do inversor. Além deste fato, como o controlador de carga tem como parâmetro de “tensão mínima de desconexão (LVD)” a tensão entre os seus terminais destinados a bateria, pode ocorrer um corte prematuro da bateria devido à equivocada leitura da tensão da bateria, que pela queda de tensão no resistor “*shunt*”, apresentaria um valor maior que o lido pelo controlador.



**Figura 60 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 21º dia - lâmpadas fluorescentes.**

**Fonte: Autoria própria.**

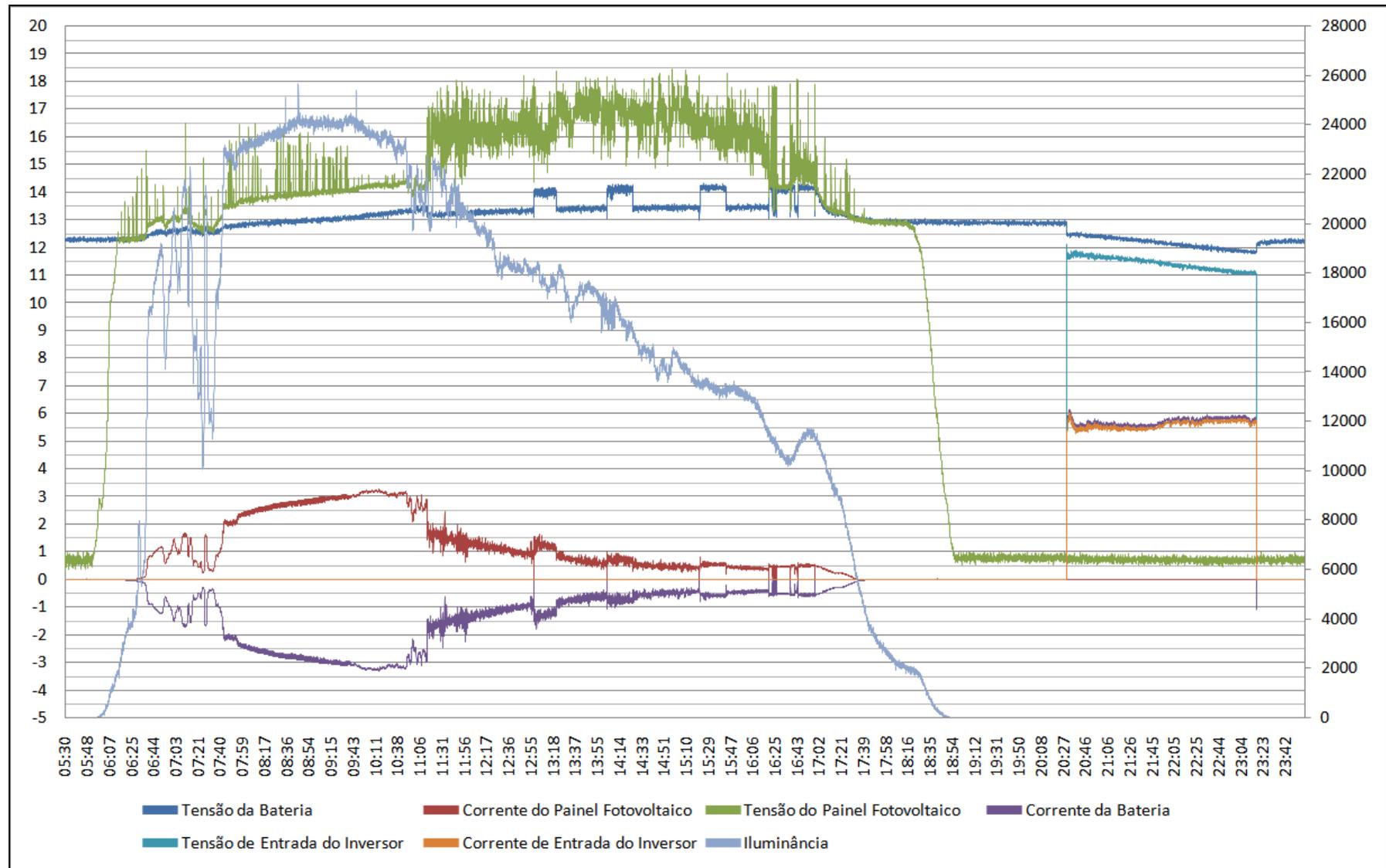
O gráfico apresentado na Figura 60, mostra o balanço de energia do sistema fotovoltaico. Nele observa-se que a energia demandada pela carga foi próxima a esperada de 168 Wh. Este acréscimo de 7,538 Wh está relacionado com as perdas nos componentes (inversor, cabos e resistor “*shunt*”), sendo possível ainda a consideração que tenha ocorrido uma alteração do fator de potência das lâmpadas, que podem acarretar um aumento da potência total demandada pela carga, onde é considerada ainda a existência da potência reativa. Esta hipótese pode ser considerada pelo fato da tensão CA, oriunda do inversor, ser senoidal modificada acarretando um comportamento da carga diferente do seu comportamento quando suprida por tensão puramente senoidal (as formas de onda da corrente e da tensão e as transformadas rápidas de Fourier das correntes podem ser vistas no APÊNDICE B). Contudo deve ser feito um estudo mais aprofundado sobre esta temática. Além desses fatores, existem ainda erros intrínsecos ao processo de aquisição de dados que também podem distorcer os resultados.

Também fica evidente a relação entre a energia demandada pela carga e a oriunda da bateria. Esta relação pode ser interpretada como quantidade de energia oriunda da bateria que supriu a necessidade da carga (inversor e lâmpadas fluorescentes). Esta relação foi de 0,9187, indicando que cerca de 91,87 % da energia que saiu da bateria teve como destino o inversor e, conseqüentemente, as lâmpadas. Os 8,13 % restantes, representam as perdas nos componentes, principalmente nos resistores “*shunt*”, mas também no controlador de carga e cabos que interligam os componentes.

O valor do balanço de energia da bateria mostra que houve uma maior energia entrando na bateria que saindo dela. Assim, mesmo com o suprimento da energia demandada pela carga, houve uma quantidade de energia sobressalente que pôde ser usada no decorrer dos dias de funcionamento.

A diferença de aproximadamente 14,6 Wh entre as energias, gerada pelo painel fotovoltaico e recebida pela bateria, está relacionada com a energia potencialmente útil gerada pelo painel que, devida a bateria já apresentar a carga necessária e o controlador de carga atuar protegendo a sobrecarga da bateria, foi descartada no período de flutuação da bateria.

O gráfico da Figura 59 apresenta o comportamento do 22º dia de ensaio.



**Figura 61 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 22º dia - lâmpadas fluorescentes.**  
 Fonte: Autoria própria.

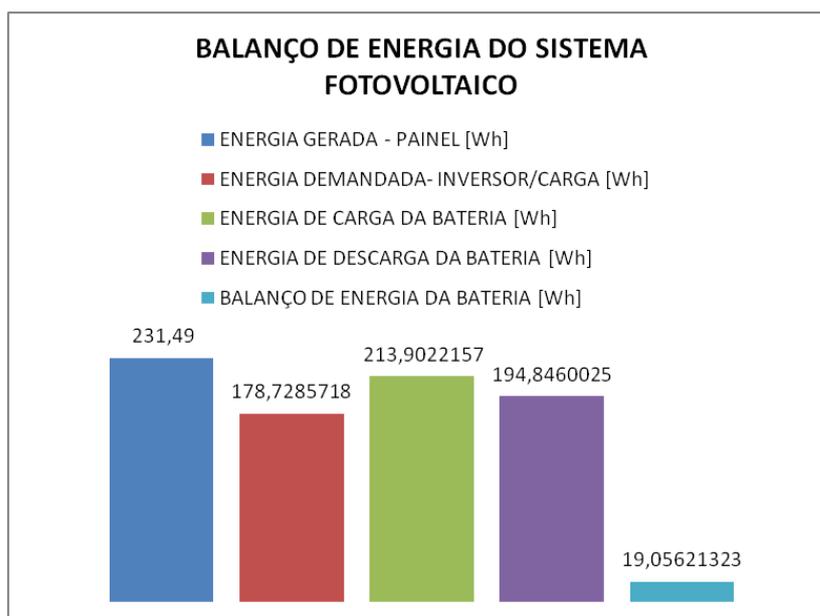
O 22º dia de ensaio das lâmpadas fluorescentes teve o período manhã com muitas nuvens e garoa no início do dia até as 7h45min e nevoeiro, que se dispersou no decorrer da manhã. No período da tarde o dia permaneceu estável com sol encoberto por nuvens pouco densas até o final da tarde, por volta das 16h00min quando houve um aumento de nuvens, com leve melhora as 17h00min.

Na Figura 61 é ilustrado o comportamento deste dia. O período de carregamento da bateria se deu das 6h15min, inicialmente com uma corrente baixa devido tempo desfavorável que durou até aproximadamente às 7h45min para então melhorar gradativamente até as 10h00min, as 11h20min quando ocorreu a atuação do controlador de carga colocando a bateria em flutuação. Esse período de tempo foi menor que o do 21º dia mesmo sendo um dia com condições menos favoráveis que o anterior. Isto se deve ao fato de existir uma energia sobressalente do 21º dia que refletiu em uma menor energia de carga da bateria no 22º dia.

No período de flutuação, ocorrido das 11h20min às 17h00min, se pôde ver um comportamento semelhante ao visto para este período no 21º dia, degraus ascendentes no valor da tensão e descendentes no valor da corrente de carga da bateria, com momento de correntes do painel fotovoltaico e da bateria com valor nulo e a tensão do painel fotovoltaico com valores altos indicando estar em aberto.

No final do dia, das 17h00min às 17h45min, ocorre a re-conexão do painel à bateria. Novamente com baixa potência devido à baixa radiação solar incidente no painel agravada pela condição desfavorável do tempo.

Às 20h30min é ligada a carga, que operou até as 23h18min. Seu funcionamento apresenta características semelhantes às mostradas no 21º dia, início de funcionamento com corrente superior a de regime até aquecerem e queda de tensão da bateria decorrente da entrada da carga em operação, bem como sua descarga pela rampa decrescente da tensão da bateria.



**Figura 62 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 22º dia - lâmpadas fluorescentes**  
**Fonte: Autoria própria.**

O gráfico da Figura 62 mostra o balanço das energias durante o 22º dia. Novamente a energia demandada pela carga, 178,73 Wh, foi próxima a calculada 168 Wh.

A relação entre a energia demandada pela carga e a energia de descarga da bateria ficou muito próxima a do dia anterior, sendo agora de 0,91728, ou seja, 91,728 % da energia oriunda da bateria teve como destino a carga (inversor e lâmpadas). A energia restante, 8,272 %, é relativa as perdas.

Nele é possível ainda se observa que, como no 21º dia, houve um excedente de energia na bateria, agora no valor de 19,06 Wh, que serve como reserva para o dia posterior.

A diferença entre as energias gerada pelo painel e a que foi armazenada na bateria, no valor de 17,59 Wh, novamente tem relação com a energia potencialmente útil gerada pelo painel que foi descartada.

Como vemos pelo gráfico da Figura 61, o intervalo de tempo em que a bateria esteve em flutuação foi maior que no 21º dia (Figura 59). Desta forma a energia descartada no 21º dia foi maior mesmo com condições do tempo piores.

O gráfico da Figura 59 apresenta o comportamento do 23º dia de ensaio.

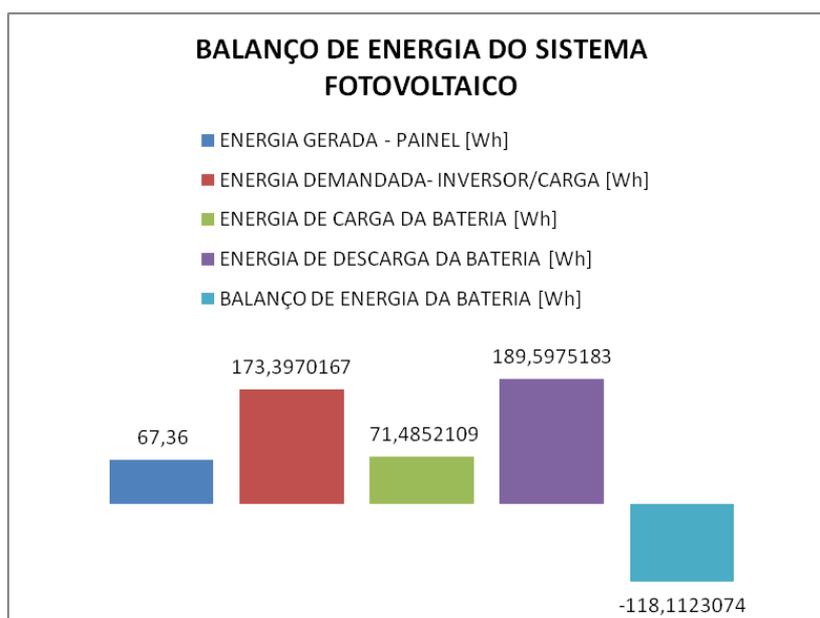


**Figura 63 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 23º dia - lâmpadas fluorescentes.**  
 Fonte: Autoria própria.

O 23º dia de ensaio das lâmpadas fluorescentes teve um tempo muito chuvoso e nublado. Durante a manhã houve momentos de Sol, por volta das 7h45min e às 9h25min. No entanto, o restante do dia foi nublado com a ocorrência de chuvas durante o decorrer do dia, tendo um momento muito crítico das 13h00min às 14h45min, quando houve um escurecimento do céu e muita chuva. Sendo este o dia mais crítico para a geração fotovoltaica analisado não só para as lâmpadas fluorescentes.

O período onde ocorreu a carga da bateria se deu durante todo o dia, pois não houve energia gerada suficiente para suprir a necessidade de carga da bateria por completo. Isto fica evidente pelas baixas correntes de carga da bateria e do painel, e também pela tensão do painel, que esteve sempre muito próxima a da bateria, e em alguns momentos do dia até menor. Desta forma, a bateria não chegou ao estado de flutuação.

À noite, às 20h30min, a carga entrou em operação até as 23h18min. Como nos dias anteriores apresentou um comportamento similar, onde a corrente inicialmente é mais alta até que a lâmpada aqueça.



**Figura 64 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 23º dia - lâmpadas fluorescentes.**

**Fonte: Autoria própria.**

O balanço de energia 23º dia do sistema fotovoltaico alimentando as lâmpadas fluorescentes é visto nos gráficos da Figura 64. Onde se vê que, como nos demais dias analisados, a energia demandada pela carga, no valor de 173,397 Wh, permaneceu próxima a calculada de 168 Wh.

A relação entre a energia demandada pela carga e a energia de descarga da bateria permaneceu como nos dias anteriores, apresentando agora um valor de 0,91455, ou seja, 91,455 % da energia que saiu da bateria foi destinada a carga. Sendo os 8,545 % restantes relativos a perdas.

Nesse dia, ocorreu o balanço negativo de energia na bateria, em outras palavras, saiu mais energia da bateria que entrou. Isto é mostrado pelo valor de -118,11 Wh da Figura 64. Com isto recorreu-se a energia que havia sido armazenada na bateria de outros dias

Outro fato importante é a energia gerada pelo painel fotovoltaico e a energia de carga da bateria. Embora apresentem um erro, inerente ao sistema de coleta de dados, devido principalmente erros de resistores e erros de parametrização, os valores são próximos, indicando que, por mais que seja pouca energia gerada pelo painel, ela foi enviada a bateria quase que em sua totalidade.

O gráfico da Figura 59 apresenta o comportamento do 24º dia de ensaio.

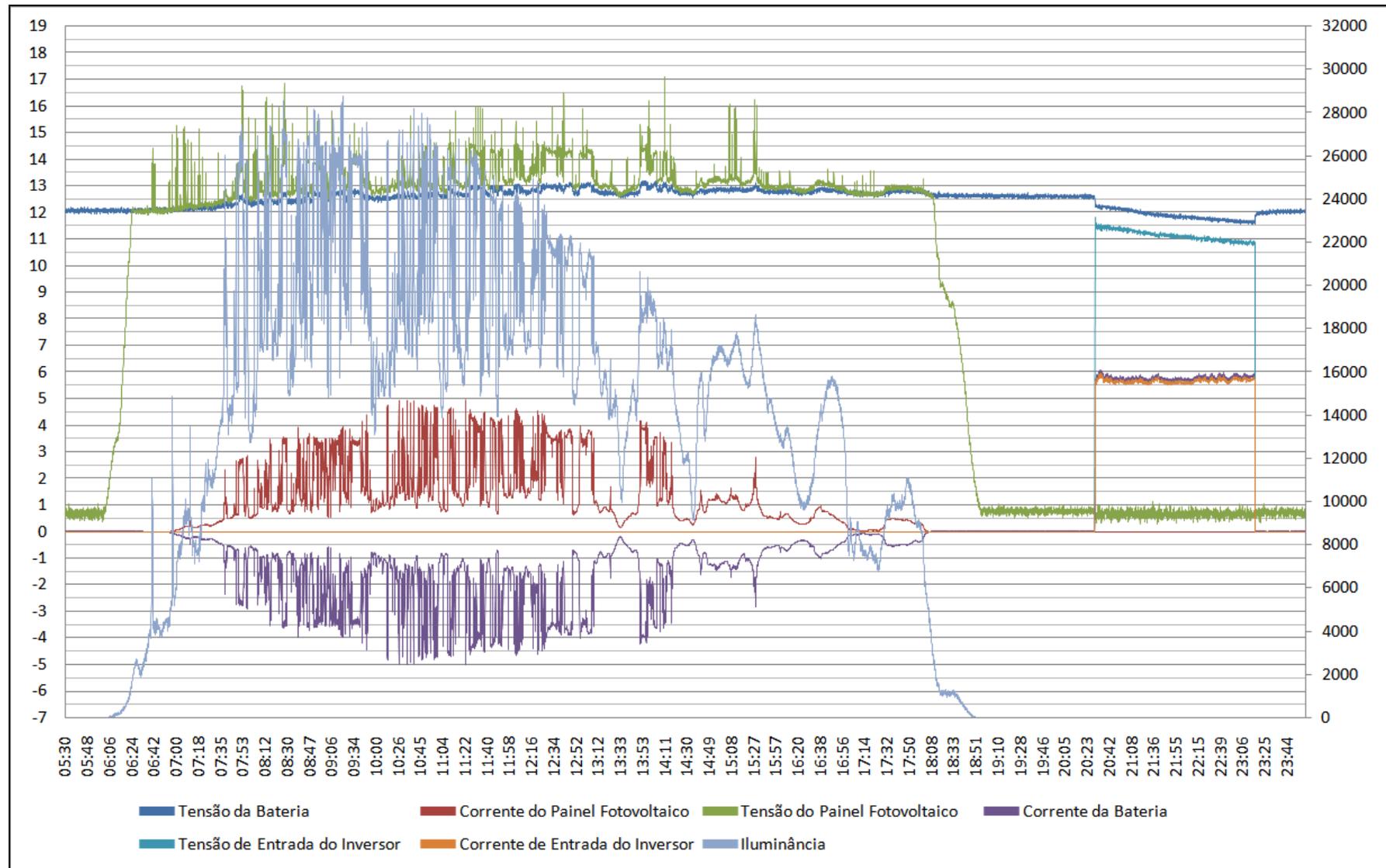
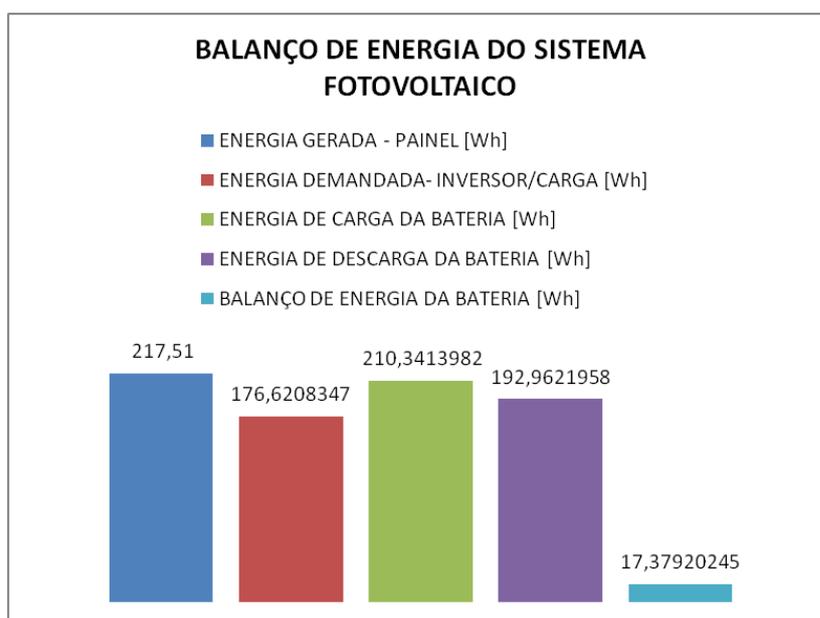


Figura 65 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 24º dia - lâmpadas fluorescentes.  
 Fonte: Autoria própria.

O 24º dia de ensaio das lâmpadas fluorescentes foi de Sol entre nuvens durante a manhã com chuva ao final da tarde. Como pode-se ver na Figura 65 foi um dia com grande instabilidade do tempo, onde em muitos momentos o Sol foi encoberto por nuvens. A partir das 14h20min o tempo se tornou nublado e as 16h55min houve chuva com duração até as 17h30min.

O período de carga da bateria durou todo o dia. Mesmo com condições climáticas melhores em relação ao dia anterior, tendo momentos de Sol pleno, sem nuvens, que causaram grandes valores de corrente de carga, o período de carga se estendeu pelo dia todo não alcançando o período de flutuação da bateria.

Como nos demais dias descritos, a carga foi acionada às 20h30min, permanecendo neste estado até as 23h18min. Novamente, houve uma corrente demandada maior no início do funcionamento das lâmpadas, desta vez com um mais tímido que nos dias já descritos.



**Figura 66 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 24º dia - lâmpadas fluorescentes.**

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 66 mostra o balanço das energias no sistema fotovoltaico para o 24º dia. Por meio dele são tiradas importantes informações.

A energia demandada permaneceu coerente com demais dias descritos, apresentando um valor de 176,62 Wh ainda próximo ao calculado de 168 Wh.

A relação da energia demandada e a de descarga da bateria continuaram próximas as dos demais dias, agora com um valor de 0,91532, portanto, 91,532 % da energia da bateria teve como finalidade suprir a carga enquanto que os 8,468 % restantes se referem as perdas.

O aspecto importante deste dia está na troca de energia entre o painel e a bateria, onde a energia gerada pelo painel e a energia de carga da bateria apresentaram valores próximos. Com isto pode-se, relacionar que a grande parte da energia gerada foi usada para carregar a bateria, que necessitava de carga após o 23° dia onde sofreu um déficit de energia, não havendo descarte de energia gerada.

O valor do balanço de energia da bateria de 17,38 Wh, mostra que houve uma energia sobressalente deste dia. No entanto, devido o dia anterior (23° dia) ter sido muito desfavorável, existe ainda a necessidade de mais energia para a bateria voltar a ter a quantidade adequada de energia reserva.

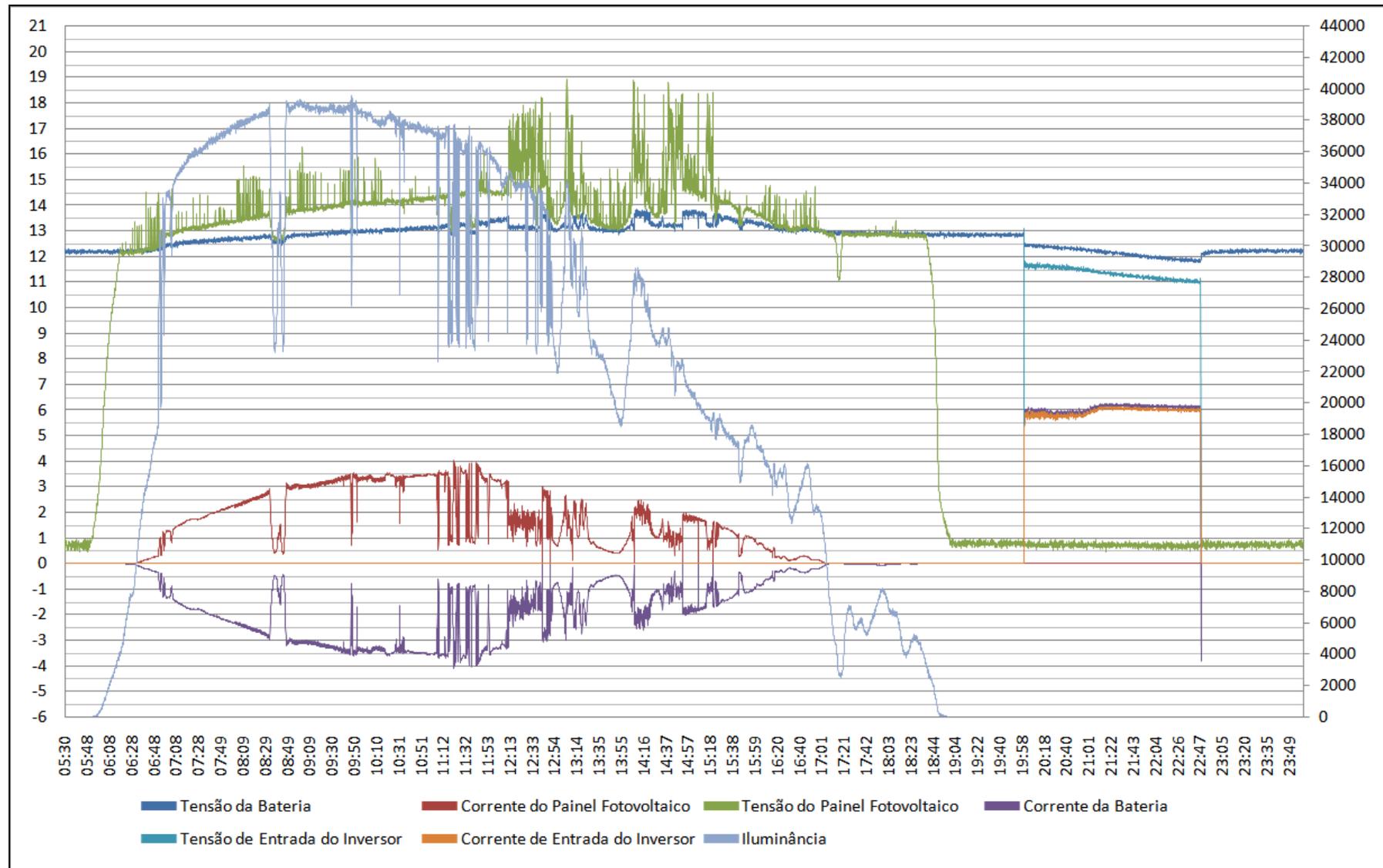
#### 4.3.2 Comportamento do sistema fotovoltaico para a iluminação LED

Para o ensaio com as lâmpadas LED foram coletados os dados de 5 dias seguidos de ensaio: 15° dia, 16° dia, 17° dia, 18° dia e 19° dia. Assim pode-se obter o comportamento do sistema ao fim de cada dia e também a influência de cada dia em seus adjacentes.

Assim como para as lâmpadas fluorescentes, foi construído um gráfico do comportamento do sistema fotovoltaico para cada um dos dias separadamente.

Lembrando que os valores de tensão e corrente são apresentados no eixo vertical esquerdo enquanto que a iluminância tem seus valores no eixo vertical direito, sendo esses valores apenas para fins comparativos. Sendo que o eixo horizontal mostra o tempo em horas da coleta de dados.

O gráfico da Figura 67 apresenta o comportamento do 15° dia de ensaio das lâmpadas LED.



**Figura 67 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 15º dia - lâmpadas LED.**  
 Fonte: Autoria própria.

O 15º dia de ensaio das lâmpadas LED (Figura 67) teve uma manhã de Sol com momentos de tempo nublado e com surgimento de nuvens das 11h00min às 11h50min. À tarde o tempo ficou nublado das 13h20 as 14h00min com ocorrência de chuvas ao final deste intervalo e também ao final do dia as 17h00min.

O período de carga da bateria se estendeu das 6h20min até 12h00min. Como é possível ver pelo gráfico da corrente no painel e na bateria na Figura 67, pela manhã houve momentos de grande potência gerada, chegando a gerar 3,5 A de corrente no painel.

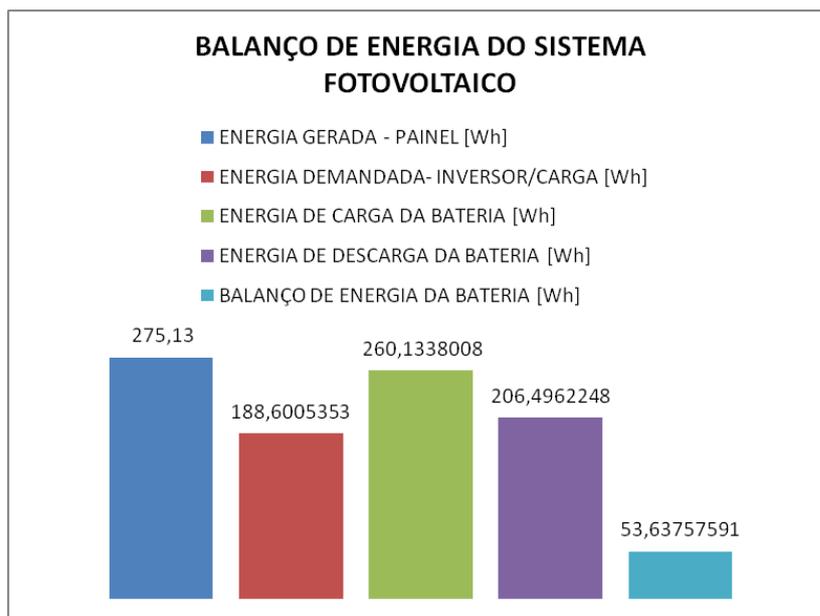
Durante a tarde, após 12h00min, a bateria entrou em flutuação. No entanto esse estado não durou muito tempo. Durante o período da tarde, devido o aumento de nuvens e tempo nublado com chuva em alguns momentos, houve intercalamento de períodos de carga da bateria e flutuação. Durante o início da tarde das 12h00min as 12h55min a bateria esteve em flutuação com grande potência sendo descartada pelo tempo ainda estar em plenas condições de geração fotovoltaica. Isto pode ser visto pela tensão do painel se apresentar instável e maior que a tensão da bateria, além de ocorrer o completo corte da bateria pelo controlador, visível pelos momentos de corrente com valor nulo. Após esse intervalo, das 12h55min as 14h05min, o grande aumento de nuvens e a ocorrência de chuvas fez com que o controlador de carga novamente conectasse o painel à bateria a fim de carregá-la. Isto é visível pela relação direta da corrente do painel e da bateria com a curva da iluminância além da diminuição da tensão do painel, indicando que este foi conectado a bateria. No entanto dentro deste intervalo ocorreram momentos de curto espaço de tempo em que a bateria se encontrou em flutuação. Vistos pelos valores de corrente muito baixos. A partir das 14h05min até 15h20min as nuvens e a chuva diminuíram, então novamente a bateria teve momentos em flutuação mais significativos, vistos pelos momentos de corrente nula do painel e da bateria. Além da tensão do painel ter momentos com valores muito altos. Contudo dentro desse intervalo ainda ocorreram momentos de carga da bateria.

Ao final do dia, a partir das 15h20min, o controlador de carga re-conectou o painel à bateria a fim de carregá-la agora com baixa potência devido a baixa radiação solar incidente no painel. Com a chuva ocorrida as 17h00min houve queda de tensão do painel e a desconexão da bateria não havendo momento significativo de carga da bateria após esse momento.

As 20h00min a carga (inversor e lâmpadas LED) foi acionada sendo desligada às 22h48min. Ao se observar o valor de corrente demandado, é visto um comportamento inesperado, onde, por mais que a lâmpada LED apresente uma potência inferior a lâmpada fluorescente, seu valor de corrente demandada se apresentou maior. Dentro deste intervalo de tempo ainda se vê que a corrente demandada pela carga esteve constante com um valor inferior a 6 A até cerca de uma hora após seu acionamento, quando ocorreu um aumento de sua corrente para valores maiores que 6 A. Isto está relacionado com a elevação da temperatura, que para a lâmpada LED é prejudicial a seu funcionamento.

A corrente demandada de aproximadamente 6,2 A da lâmpada LED, maior que o valor observado para a lâmpada fluorescente por volta de 5,75 A e maior que a máxima estipula para o pior caso, considerando perdas, de 6 A, possivelmente tem relação com a potência aparente da lâmpada LED. A potência considerada nos cálculos pondera apenas a potência ativa, onde não é considerada a potência reativa. Assim, como a forma de onda da tensão gerada pelo inversor usado é senoidal modificada, a lâmpada LED, como ocorreu com a lâmpada fluorescente, pode ter sofrido uma alteração em seu fator de potência, aumentando a potência reativa, e desta forma ocasionado um aumento significativo de corrente (as formas de onda da tensão e da corrente e as transformadas rápidas de Fourier das correntes podem ser vistas no APÊNDICE B). No entanto, é necessário um maior estudo sobre essa problemática que não consta nesse trabalho.

O aquecimento da lâmpada, embora esperado, também foi muito maior devido este fator.



**Figura 68 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 15º dia - lâmpadas LED.**

Fonte: Autoria própria.

O balanço de energias do sistema fotovoltaico suprindo as lâmpadas LED é visto na Figura 68.

Ao ser analisado o valor de energia demandado pela carga, é visto que o valor de 188,60 Wh esteve muito acima do esperado de 140 Wh. Sendo maior que a potência demandada pelas lâmpadas fluorescentes, por volta de 175 Wh. Isto é fruto da corrente demandada ter sido maior e tem a mesma explicação desta corrente.

No entanto a relação da energia demandada pelo inversor (188,60 Wh) e a de descarga da bateria (206,496 Wh) permaneceu próxima a vista nos ensaios com as lâmpadas fluorescentes, sendo agora no valor de 0,9133. Portanto, 91,33 % da energia oriunda da descarga da bateria supriu a carga (inversor e lâmpadas). A perda no valor 8,67 %, uma perda um pouco maior que das lâmpadas fluorescentes, é resultado da maior corrente demandada, pois ao circular mais corrente pelo resistor "shunt" a potência que ele dissipou acabou sendo maior.

O balanço de energia da bateria mostra que, ao final do dia, houve uma energia sobressalente de 53,64 Wh, ou seja, a bateria recebeu mais energia do que lhe foi demandada. Ficando essa energia reservada para os dias que viriam. Isto indica que no geral o dia teve boas condições climáticas para a geração fotovoltaica.

A diferença das energias gerada pelo painel (275,13 Wh) e de carga da bateria (260,1338 Wh) no valor de 15 Wh, novamente tem relação com a energia potencialmente útil gerada pelo painel que foi descartada. Embora o dia não tenha apresentado um período grande de flutuação, a potência gerada descartada nesses pequenos períodos foi grande.

O gráfico da Figura 69 apresenta o comportamento do 16º dia de ensaio das lâmpadas LED.

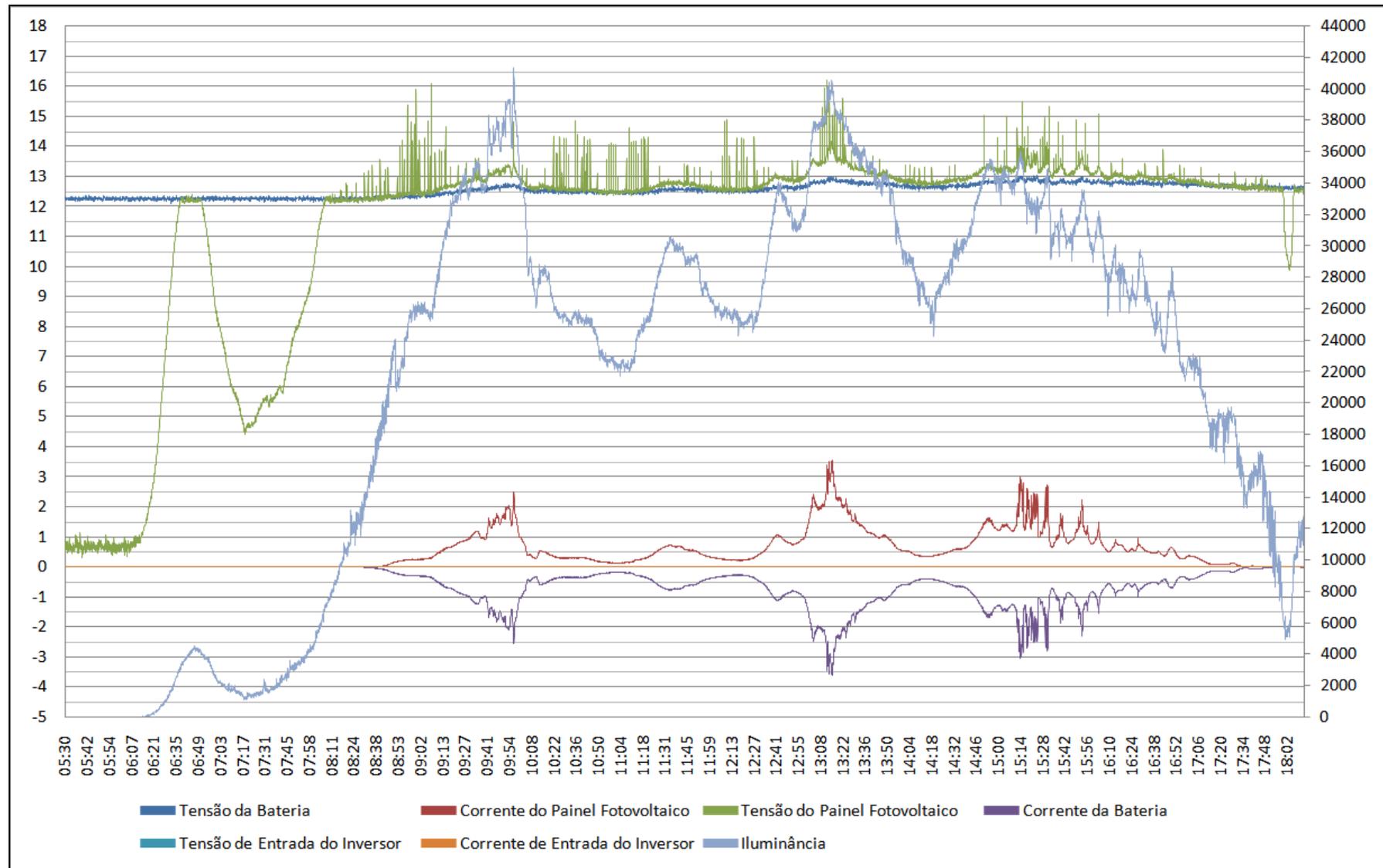
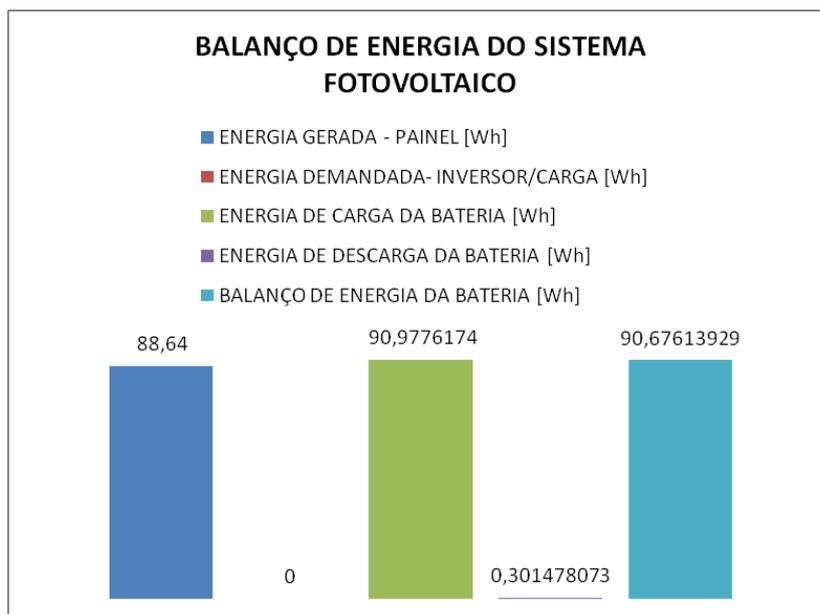


Figura 69 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 16° dia - lâmpadas LED.  
 Fonte: Autoria própria.

O 16° dia de ensaio das lâmpadas LED (Figura 69) foi de tempo muito chuvoso com tempestades. Durante o dia ocorreram poucos momentos com Sol. Neste dia ocorreu queda de energia elétrica da rede devido o mau tempo e consequentemente o programa de monitoramento do sistema fotovoltaico desligou perdendo informações e o controle do sistema fotovoltaico. No entanto esse dia se torna importante para o entendimento dos dias posteriores.

O mau tempo ocorrido durante todo o dia não propiciou a completa carga da bateria, desta forma o período de carregamento desta se estendeu durante todo o dia com correntes e tensões baixas e não houve período de flutuação da bateria.

Às 18h18min ocorreu a queda de energia da rede. Este ocorrido fez com que o computador desligasse, bem como o sistema de aquisição de dados. Ao retornar a energia elétrica o computador religou juntamente com o microcontrolador. Como o microcontrolador, quando simplesmente ligado, tinha suas saídas digitais em flutuação, sua saída destinada à ligar as lâmpadas ficou com sinal 1, ou seja, ligou as lâmpadas sem o controle do programa desenvolvido em LABVIEW. Desta forma, as lâmpadas ficaram ligadas por um tempo indeterminado, apenas conhecido que foi maior que as 2,8 horas usuais, pela grande queda de tensão nos terminais da bateria. Como resultado ocorreu uma descarga da bateria maior que a normal.



**Figura 70 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 16º dia - lâmpadas LED.**

**Fonte: Autoria própria**

O balanço de energia do 16º dia de ensaio das lâmpadas LED é mostrado na Figura 70. Neste dia o balanço de energia foi atípico, pois não aparece a energia demandada, devido a perda do controle do sistema de aquisição de dados.

Para o valor de energia descartada da bateria se pode ver um pequeno valor de 0,30 Wh, este valor está relacionado com a energia consumida no controlador de carga, que é muito baixa.

Embora os resultados de energia gerada pelo painel (88,64 Wh) e energia de carga da bateria (90,98 Wh) estejam incoerentes, devido o erro inerente ao sistema de aquisição de dados, eles são muito próximos indicando que a energia gerada foi quase que completamente enviada à bateria.

Como já foi descrito, embora não apresente nos gráfico da energia demandada, houve sim uma energia demandada enquanto o sistema de aquisição esteve fora de operação e é conhecido que esta energia foi maior que a usual de cerca de 189 Wh.

O gráfico da Figura 71 apresenta o comportamento do 17º dia de ensaio das lâmpadas LED.

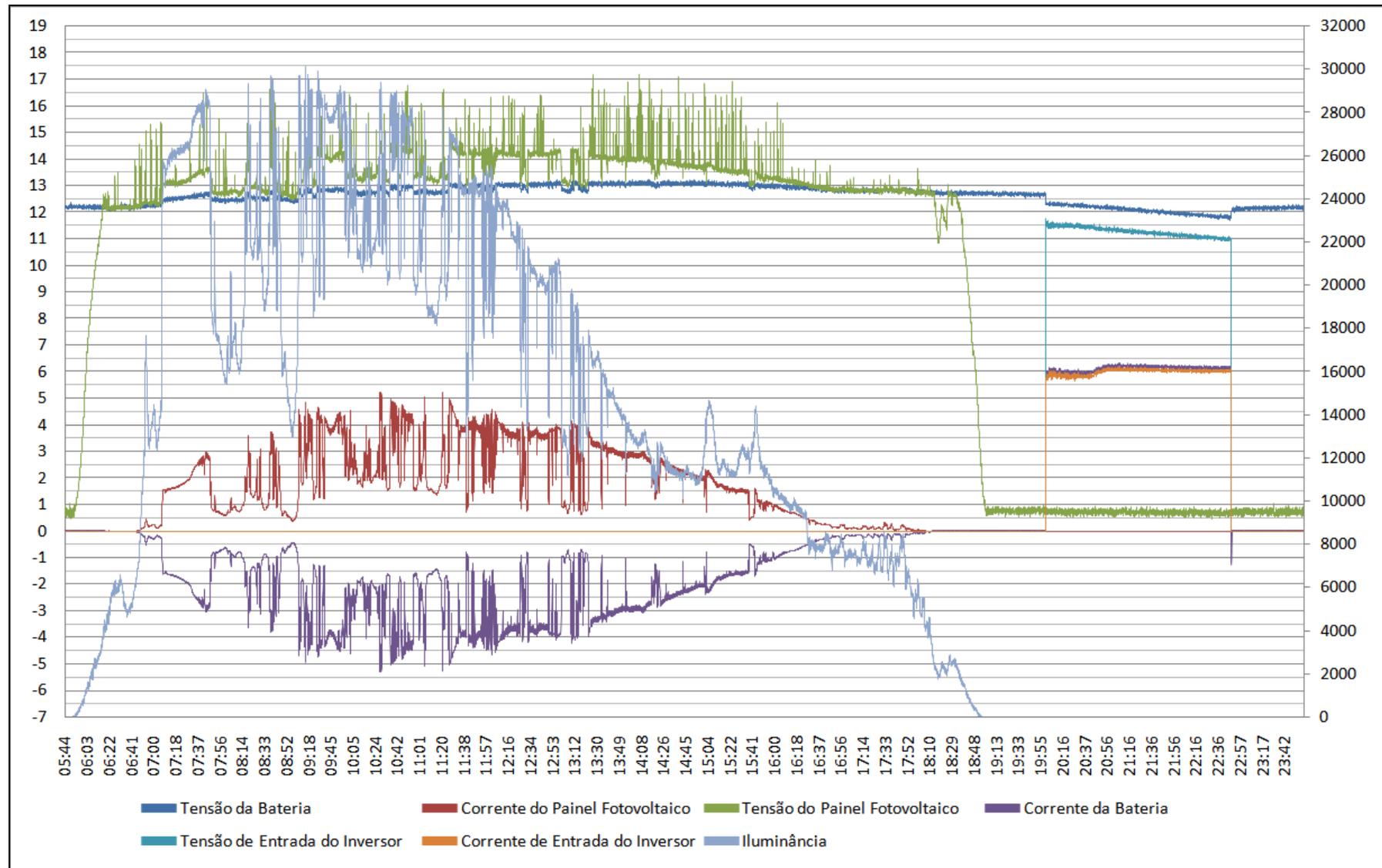


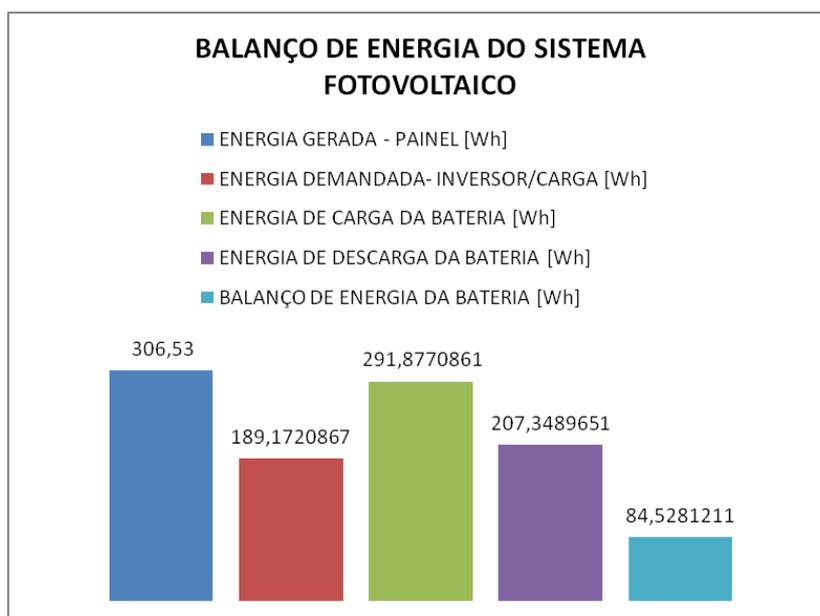
Figura 71 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 17º dia - lâmpadas LED.

Fonte: Autoria própria.

O 17º dia de ensaio das lâmpadas LED (Figura 71) teve um dia com tempo instável com momentos de chuva e nublado. No entanto ocorreram muitos momentos com céu limpo e Sol.

O período de carregamento da bateria se estendeu durante todo o dia, das 6h45min às 18h00min, com a bateria não chegando a entrar em flutuação. Durante o dia ocorreram muitos momentos de baixa produção energética do painel, contudo, nos momentos propícios a geração houve correntes de carga da bateria e do painel de grandes valores chegando a valores de 5 A. No entanto, mesmo sendo um dia com boas condições para geração fotovoltaica, não foi alcançado o período de flutuação da bateria.

No período da noite, das 20h00min às 22h48min, foi ligada a carga apresentando um comportamento semelhante ao do 15º dia, onde a corrente inicialmente apresenta valores inferiores à 6 A e após uma hora de funcionamento aumenta para um valor superior a 6 A, chegando a 6,2 A em alguns momentos.



**Figura 72 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 17º dia - lâmpadas LED**

Fonte: Autoria própria.

O balanço de energia do 17º dia de ensaio das lâmpadas LED é mostrado na Figura 72. Nele podemos reparar que a energia demandada pela carga (189,17 Wh) esteve muito próxima a do 15º dia (188,6 Wh).

A relação entre a energia demandada pela carga e a energia de descarga da bateria continuo dentro da esperada, agora no valor de 0,9123. Indicando que 91,23 % da energia que saiu da bateria teve como destino a carga, sendo os 8,77 % restantes relativos às perdas.

A consideração mais importante visível na Figura 72, esta relacionada com a troca energética entre o painel e a bateria. O valor de 84,538 Wh encontrado para o balanço de energia na bateria indica que mesmo com o suprimento da energia da carga uma quantidade de energia sobressalente muito grande. Ao se comparar o valor de 291,88 Wh da energia de carga da bateria se observa que ele está muito próximo ao da energia gerada pelo painel fotovoltaico de 306,53 Wh. Estes dois fatos mostram que, por ter ocorrido uma descarga da bateria muito grande no 16º dia, existia uma necessidade da bateria de restabelecer a energia reserva que lhe demandada. Por este motivo quase que toda a energia gerada pelo painel teve como destino a bateria.

O gráfico da Figura 73 apresenta o comportamento do 18º dia de ensaio das lâmpadas LED.

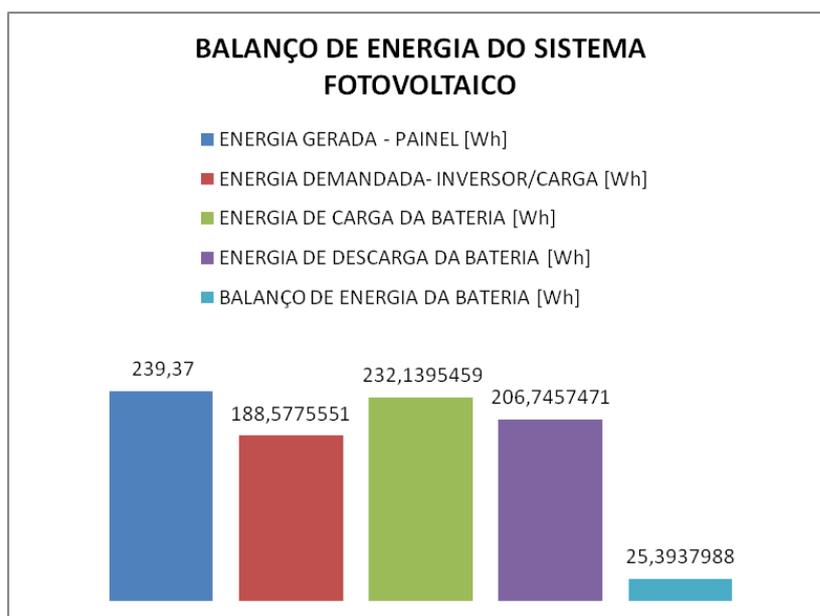


**Figura 73 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 18° dia - lâmpadas LED.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O 18° dia de ensaio das lâmpadas LED (Figura 73) foi nublado durante grande parte do dia. Entre as 9h30min e as 13h40min, ocorreram períodos de céu limpo com Sol e após as 14h40min o tempo ficou limpo com o aumento gradual de nuvens até o anoitecer as 18h20min.

O estado de carga da bateria durou todo o período do dia, das 6h40min as 18h20min. Em alguns momentos houve correntes de valores altos, por volta de 4 A, indicando o aparecimento do Sol. No entanto durante grande parte do dia a carga se deu com correntes baixas. Portanto o carregamento da bateria não foi completo e esta não chegou a entrar em flutuação.

A noite, das 20h00min as 22h48min, a carga esteve em operação apresentando o mesmo comportamento dos demais dias ensaiados para as lâmpadas LED. Novamente durante uma hora apresentou uma corrente demandada por volta de 6 A, que aumentou para um valor superior a 6 A após cerca de uma hora.



**Figura 74 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 18° dia - lâmpadas LED**

Fonte: Autoria própria.

O balanço de energia do 18° dia de ensaio das lâmpadas LED é mostrado na Figura 74. Nele observa-se que não houve alteração significativa na energia

demandada pela carga em relação aos demais dias de ensaio das lâmpadas LED, sendo esta agora no valor de 188,58 Wh.

A relação entre as energias demandada pela carga e de descarga da bateria permaneceu dentro do esperado, indicando que 91,21 % da energia oriunda da bateria teve como destino as cargas, enquanto que os 8,79 % restantes são relativos as perdas.

Embora o dia não tenha apresentado condições adequadas para a geração fotovoltaica, o fato de no 16° dia ter ocorrido uma grande descarga da bateria, pode ser visto ainda no 18° dia. A diferença das energias gerada pelo painel (239,37 Wh) e de carga da bateria (232,14 Wh) foi muito pequena, indicando que a grande parte da energia gerada foi armazenada na bateria. Sendo que o balanço de energia da bateria indica que houve um excedente de carga de 25,39 Wh que foi armazenado na bateria servindo de reserva para os dias posteriores.

O gráfico da Figura 75 apresenta o comportamento do 19° dia de ensaio das lâmpadas LED.

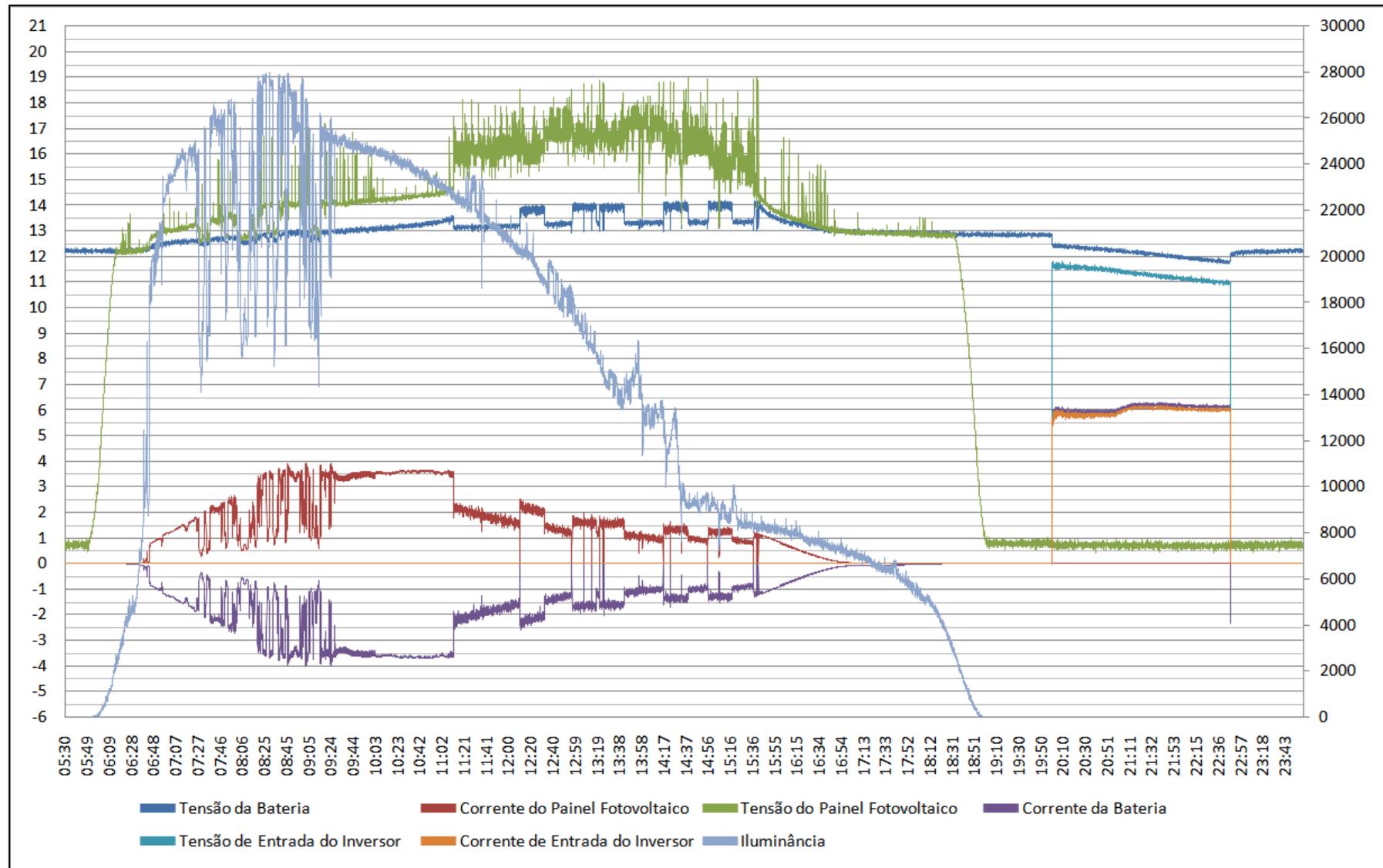


Figura 75 - Comportamento do sistema fotovoltaico durante ensaio - 19º dia - lâmpadas LED.  
 Fonte: Autoria própria.

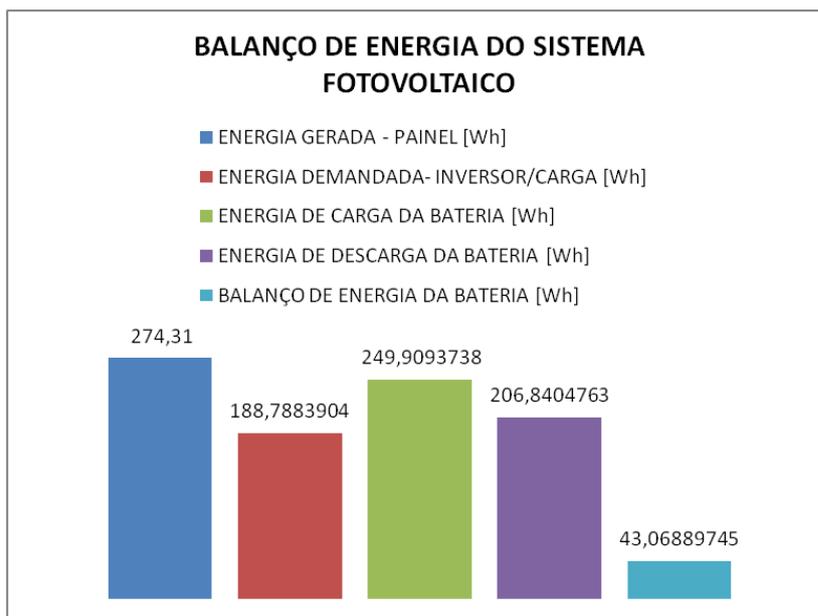
O 19º dia de ensaio das lâmpadas LED, visto na Figura 75, foi de tempo bom, tendo momentos de tempo nublado pela manhã das 7h30min as 9h30min. No restante do dia o tempo esteve estável com tempo ensolarado até aproximadamente as 15h00min, quando começou o acúmulo de nuvens e o tempo ficou nublado.

O período de carga da bateria se deu das 6h30min até as 11h10min. Dentro deste período ocorreu momentos em que a corrente de carga foi mais branda devido momentos de tempo nublado, contudo, na maior parte do tempo o carregamento da bateria foi a grande potência, sendo que das 9h30min até as 11h20min a corrente de carga foi de, em média, 3,5 A.

Com o carregamento da bateria finalmente a bateria entrou em flutuação, após 2 dias onde ocorreu apenas o carregamento da bateria. Neste dia, o período de flutuação durou das 11h10min até as 15h40min, e ocorreu durante um tempo ensolarado, muito propício para a geração fotovoltaica. Este período pode ser visto pelos degraus ascendentes nos valores de tensão e descendentes nos valores de corrente da bateria, assim como pelos momentos onde ocorreram valores nulos da corrente do painel e da bateria e pela elevada tensão nos terminais do painel, indicando estarem em aberto.

Às 15h40min, com o acúmulo de nuvens houve a diminuição da capacidade de geração do painel neste dia, o que refletiu na tensão do painel. Assim houve a reconexão do painel a bateria, até o fim do dia às 18h15min, agora com uma potência gerada mais branda.

À noite, das 20h00min as 22h48min, a carga operou da mesma forma já descrita nos dias anteriores.



**Figura 76 - Gráfico do balanço energético do sistema fotovoltaico - 19º dia - lâmpadas LED.**

**Fonte: Autoria própria.**

O balanço da energia do 19º dia de ensaio das lâmpadas LED é mostrado na Figura 76. Nele podemos constatar que a energia demandada (188,79 Wh) continuou condizente com os demais dias analisados, bem como a relação entre a energia demandada e a energia de descarga da bateria, que agora indicou que 91,27 % da energia que saiu da bateria chegou a carga. Agora as perdas foram de 8,73 %.

Neste dia ocorre finalmente a total recuperação da carga da bateria, que entrou em flutuação.

O balanço de energia da bateria mostra que, ao final do dia ainda restaram, 43,07 Wh reservados para os dias posteriores.

O fato de maior importância ocorre da análise da diferença entre a energia gerada pelo painel fotovoltaico e a energia que foi armazenada na bateria que foi 24,40 Wh, o maior valor registrado nos ensaios. Este valor indica que ao entrar em flutuação, a energia potencialmente útil gerada pelo painel que foi descartada foi de 24,40 Wh. Isto tem sentido ao vermos as boas condições do dia que possibilitavam a geração de uma maior quantidade de energia que não foi aproveitada pelo fato do controlador desconectar a bateria a fim de preservá-la.

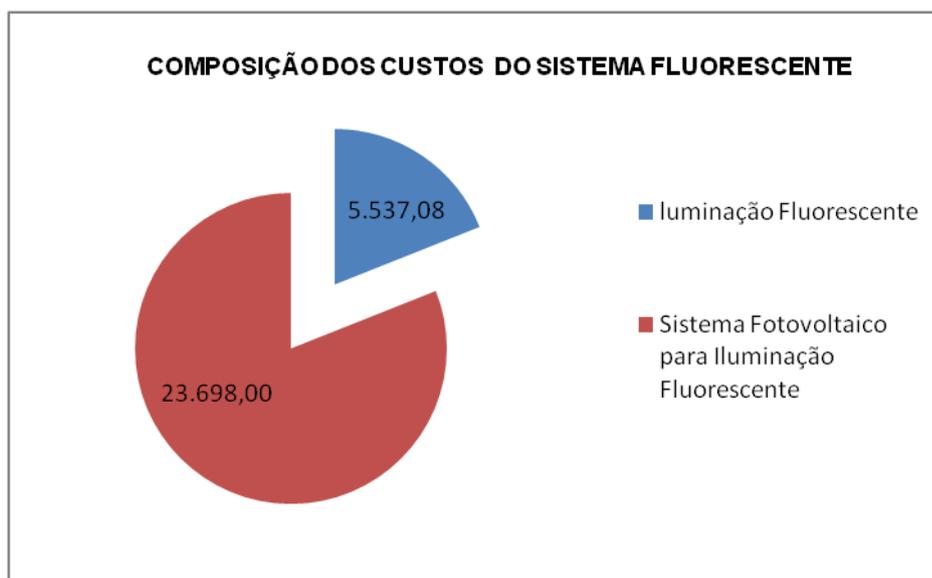
#### 4.4 ANÁLISE DE CUSTOS

Com base nas quantidades e especificações das lâmpadas obtidas anteriormente nos projetos luminotécnicos, tanto para utilização de lâmpadas fluorescentes quanto para lâmpadas LED, assim como a especificação dos demais equipamentos dos sistemas fotovoltaicos dimensionados, podem-se estimar os custos envolvidos por meio de valores comerciais, conforme se mostra na Tabela 36 e Tabela 37.

Tabela 36 - Levantamento de Custos Estimados para o Sistema Fotovoltaico Aplicado na Iluminação com Lâmpadas Fluorescentes

Item	Preço Unitário (R\$)	QTDE (un)	Custo Total (R\$)
Lâmpada fluorescente 42 W-127V Philips PLWTWIST42W127B	45,75	4	183,00
Lâmpada fluorescente 20 W-127V Philips/PLDTWIST20W127B	19,30	2	38,60
Lâmpada fluorescente 14 W-127V Philips/PLEW14W127GENB	12,96	14	181,44
Lâmpada fluorescente 11 W-127V Philips/PLEW11W127GENB	10,26	6	61,56
Lâmpada fluorescente 27 W-127V Philips/PLWTWIST27W127B	23,30	8	186,40
Lâmpada fluorescente 23 W-127V Philips/PLWTWIST23W127B	13,05	4	52,20
Lâmpada fluorescente 18 W-127V Philips/PLED18W127GENB	11,61	2	23,22
Lâmpada fluorescente 32 W-127V Philips/TLDRS32W-S84-ECO	3,32	14	46,48
Reator Eletrônico Alto Fator Ecomaster 2x32W	28,50	7	199,50
Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 230W Tecnometal – SV-230D12	1.269,00	8	10.152,00
Controlador de Carga FlexMax MPPT 60A	2.700,00	1	2.700,00
Inversor de Energia de 1000W Loud - 24V/110V	809,00	2	1.618,00
Bateria Estacionária Freedom DF3000 170Ah/185Ah	769,00	12	9.228,00
Luminária Itaim/Rubi	166,44	22	3.661,68
Luminária Itaim/3740	129,00	7	903,00
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>29.235,08</b>

Fonte: Autoria própria.



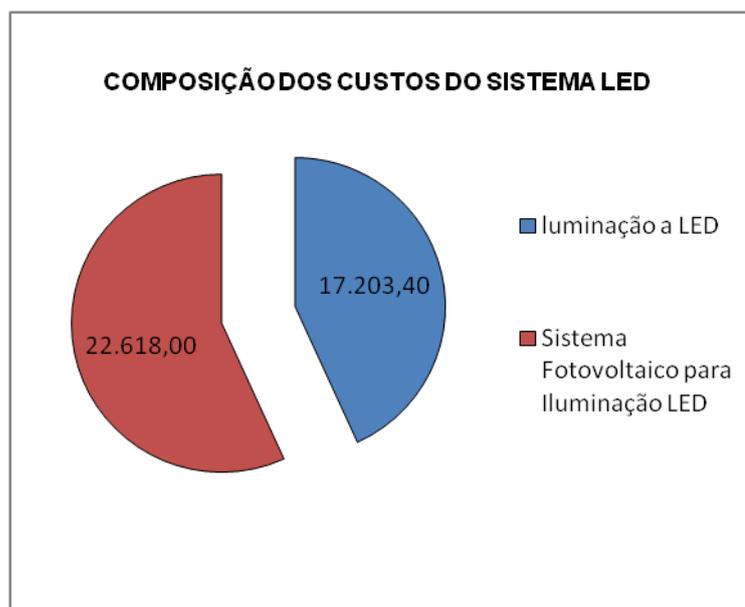
**Figura 77 - Gráfico da composição dos custos do sistema fluorescente.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como reflexo da Tabela 36, obtém-se o gráfico exposto na Figura 77, que identifica a composição dos custos relacionados com o sistema fotovoltaico (painel fotovoltaico, bateria, controlador e inversor) e com a iluminação (lâmpadas e luminárias).

**Tabela 37 - Levantamento de Custos Estimados para o Sistema Fotovoltaico Aplicado na Iluminação com Lâmpadas LED**

Item	Preço Unitário (R\$)	QTDE (un)	Custo Total (R\$)
Lâmpada LED 12,5 W -110-130V Philips/EnduraLED A19 Bulb	99,90	62	6.193,80
Lâmpada LED 9W - 100-240V- Bi-Volt Philips/MASTER LED bulb	79,90	8	639,20
Lâmpada LED 22W - 100-240 Philips/MASTER LEDtube GA	188,00	18	3.384,00
Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 230W Tecnometal – SV-230D12	1.269,00	8	10.152,00
Controlador de Carga FlexMax MPPT 60A	2.700,00	1	2.700,00
Inversor de Energia de 1000W Loud - 24V/110V	809,00	2	1.618,00
Bateria Estacionária Freedom DF2500 150Ah/165Ah	679,00	12	8.148,00
Luminária Itaim/Rubi	166,44	35	5.825,40
Luminária Itaim/3740	129,00	9	1.161,00
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>39.821,40</b>

**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 78 – Gráfico da composição dos custos do sistema LED.**

**Fonte: Autoria própria.**

O gráfico exposto na Figura 78, mostra a composição dos custos relacionados com o sistema fotovoltaico (painel fotovoltaico, bateria, controlador e inversor) e com a iluminação (lâmpadas e luminárias).

Baseando-se nos gráficos da Figura 77 e da Figura 78, podem-se comparar os custos envolvidos entre os dois sistemas, conforme a Tabela 39 e a Tabela 38.

**Tabela 38 - Comparativo dos Custos dos Sistemas Fotovoltaicos Aplicados nos Sistemas LED e Fluorescente**

<b>Descrição do custo</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>
Sistema Fotovoltaico para Iluminação LED	22.618,00
Sistema Fotovoltaico para Iluminação Fluorescente	23.698,00
<b>Diferença (R\$)</b>	<b>1.080,00</b>

**Fonte: Autoria própria.**

De acordo com a Tabela 38, pode-se tirar uma conclusão equivocada se forem analisados apenas os custos envolvidos com o sistema fotovoltaicos. No entanto, ao analisar os custos envolvidos com a iluminação, conclui-se que o

investimento necessário para implantação da iluminação a LED se mostra, neste estudo, 11.666,32 reais mais caro que a implantação da iluminação com lâmpadas fluorescentes, conforme exposto na Tabela 39.

Tabela 39 - Comparativo dos Custos com Iluminação entre os Sistemas LED e Fluorescente

<b>Descrição do custo</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>
Iluminação a LED	17.203,40
Iluminação Fluorescente	5.537,08
<b>Diferença (R\$)</b>	<b>11.666,32</b>

**Fonte: Aatoria própria.**

Portanto, no cenário atual os preços de mercado encontrados para a tecnologia LED ainda se mostram elevados, não trazendo benefício proporcional à economia verificada pela lâmpada fluorescente, quando analisada juntamente com o sistema fotovoltaico.

Observando ainda a Tabela 36 e Tabela 37, nota-se uma considerável diferença no custo total entre os projetos, apontando que o sistema fotovoltaico aplicado às lâmpadas LED custa pouco mais de 10 mil reais a mais que o sistema aplicado às lâmpadas fluorescentes. No entanto, verifica-se que os custos totais dos painéis fotovoltaicos, controlador e inversores são os mesmos. Isso se deve a dois fatores: as potências das cargas totais do circuito de iluminação foram relativamente próximas, sendo 1350 W para as lâmpadas fluorescentes e 1243 W para as lâmpadas LED; o outro fator se refere ao arranjo do sistema, que exigiu quantidade par de painéis para se obter a tensão de 24 V no barramento CC, com o objetivo de reduzir a corrente elétrica no barramento, resultando num acréscimo de 1 painel no arranjo do sistema aplicado às lâmpadas LED, o que coincidentemente resultou na mesma quantidade de painéis de mesma potência para ambos os projetos.

A partir dos dados levantados nas Tabela 36 e Tabela 37, faz-se um comparativo entre a quantidade total de lâmpadas do tipo LED e do tipo fluorescente

estimadas nos dois projetos, assim como os respectivos custos totais que esses representam, conforme se mostra na Tabela 40.

Tabela 40 - Comparativo de Quantidades e Preços Totais das Lâmpadas

Lâmpadas	QTDE (un)	Preço Total (R\$)
Fluorescente	54	772,90
LED	88	10.217,00
<b>DIFERENÇA (R\$)</b>	-	<b>9.444,10</b>

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 40 destaca a quantidade necessária de lâmpadas LED para atender o mesmo critério de fluxo luminoso obtido no projeto luminotécnico com lâmpadas fluorescentes. Além de apresentar quantidade superior, os preços de mercado das lâmpadas LED são significativamente superiores aos das lâmpadas fluorescentes, impactando num custo total de aproximadamente 13,2 vezes a mais com relação ao custo total das lâmpadas fluorescentes, representando uma diferença de 9.444,10 reais a mais.

Da mesma forma, faz-se um comparativo entre as quantidades e os preços totais das luminárias utilizadas nos dois projetos, conforme Tabela 41.

Tabela 41 - Comparativo de Quantidades e Preços Totais das Luminárias

Luminárias	QTDE (un)	Preço Total (R\$)
Luminárias para o Sistema com Lâmpadas fluorescentes	29	4.564,68
Luminárias para o Sistema com Lâmpadas LED	44	6.986,40
<b>DIFERENÇA (R\$)</b>	-	<b>2.421,72</b>

Fonte: Autoria própria.

As quantidades e preços totais das luminárias para o projeto aplicado às lâmpadas LED também foram superiores, representando 2.421,72 reais a mais que no projeto aplicado às lâmpadas fluorescentes.

Ainda no mesmo raciocínio, faz-se um comparativo entre as quantidades e os preços totais das baterias utilizadas nos dois projetos, conforme Tabela 42.

Tabela 42 - Comparativo de Quantidades e Preços Totais das Baterias

<b>Baterias</b>	<b>QTDE (un)</b>	<b>Preço Total (R\$)</b>
Baterias para o Sistema com Lâmpadas fluorescentes	12	9.228,00
Baterias para o Sistema com Lâmpadas LED	12	8.148,00
<b>DIFERENÇA (R\$)</b>	-	<b>1.080,00</b>

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, o custo total das baterias do sistema LED foi levemente inferior ao custo total das baterias do sistema fluorescente, representando uma economia de 1.080 reais neste estudo.

## 5 CONCLUSÃO

Com realização deste trabalho verificou-se que o uso da tecnologia LED na iluminação, realmente acarreta uma redução nos valores da potência instalada e, conseqüentemente, um menor gasto de energia. Contudo, essa redução não se deu na grandeza esperada. O que resultou em sistemas fotovoltaicos semelhantes, com equipamentos de características próximas.

A pouca oferta de modelos de lâmpadas do modelo LED, juntamente com o fato das lâmpadas LED ainda possuírem um baixo fluxo luminoso, foi um grande limitante e um dos causadores da proximidade nos valores das potências instaladas finais. Isto se deve ao fato de, conhecida as necessidades do ambiente, a adaptação de uma lâmpada fluorescente se dá muito mais facilmente que de uma lâmpada do tipo LED. Assim, ocorrem momentos em que existe a necessidade de uma quantidade elevada de lâmpadas LED para suprir as necessidades do ambiente, em outras os modelos ofertados possuem parâmetros de fluxo luminoso que superam os valores necessários no ambiente.

Por meio de uma mais cuidadosa análise dos resultados do projeto luminotécnico, é visto que existem situações onde a troca do sistema fluorescente pelo sistema LED foi vantajosa. No entanto, em outras, esta troca acabou aumentando o valor da potência instalada. Contudo se vê que embora a iluminação LED ainda seja muito cara, seu uso, quando adequado, é muito vantajoso do ponto de vista energético e traz reduções significativas na potência. Este fato foi visto principalmente com o uso das lâmpadas do tipo tubular LED que mesmo em condições de comparação adversas, (sendo comparada com uma lâmpada de fluxo luminoso superior) apresentaram uma grande redução na potência. Sendo que um estudo mais aprofundado, por meio de uma comparação prática deste tipo de lâmpada frente às tubulares fluorescentes, semelhante a feita neste trabalho com as lâmpadas do tipo bulbo. Onde poderão ser mostradas ainda mais qualidades desses modelos e possibilitando uma melhor análise de suas características luminotécnicas.

Quanto às lâmpadas do tipo bulbo estudadas, seu uso deve ter maiores cuidados, pois embora as lâmpadas LED apresentem menores potências em relação às de outras tecnologias, elas possuem um fluxo luminoso também menor. E quando

usadas em ambientes que carecem de um fluxo luminoso intenso elas devem ser distribuídas em mais de um ponto de luz para que se tenha o resultado desejado do ponto de vista energético e luminotécnico. No entanto, em cômodos que carecem de um fluxo luminoso menos elevado, seu uso se torna viável mesmo com apenas um ponto de luz, pois os parâmetros de ambas as lâmpadas se assemelham.

De maneira sucinta, podemos dizer que os fatores primordiais para tornar vantajosa a troca de uma lâmpada fluorescente por uma do tipo LED são a eficiência luminosa das lâmpadas e o fluxo luminoso. Pelos resultados finais do projeto luminotécnico da residência, é visto que, para lâmpadas com fluxos luminosos próximos a substituição se deu de um para um e as lâmpadas LED acabaram mostrando melhores resultados.

Quanto ao espalhamento da luz, por meio dos ensaios realizados, observa-se que já existem lâmpadas LED com um espalhamento adequado e que possibilitam a substituição das lâmpadas fluorescentes sem o prejuízo das características de iluminação procuradas nos ambientes residenciais. Embora no ensaio com as lâmpadas LED tenha ocorrido mais pontos com um valor de iluminância inferior a 70 % média medida, como foi visto esses pontos possuem iluminâncias muito próximas as vistas nos ensaios com as lâmpadas fluorescentes, que também apresentaram pontos com essa característica. Em ambos os casos, o uso de uma luminária adequada ou a melhor distribuição dos pontos de luz findaria este problema. Portanto, a realização de novos ensaios com uma melhor distribuição das lâmpadas no ambiente, pode apresentar melhores resultados para a iluminação com o uso desta tecnologia.

Com o monitoramento do sistema fotovoltaico e a visualização de seus diferentes comportamentos de acordo com os dias, em nenhum momento o suprimento da carga foi colocado em risco. Embora tenha havido dias com baixa produção de energia, chegando a dias críticos em que a energia demanda foi muito maior que a programada, devido a perda do controle do sistema de interrupção da carga, o sistema fotovoltaico conseguiu se restabelecer em no máximo dois dias, portanto dentro da autonomia estipulada, chegando a ter excedente de energia terceiro dia. Assim podemos dizer que o sistema funcionou adequadamente durante todo o período de ensaio de ambos os sistemas de iluminação. Destaca-se ainda, que muitas vezes foram vistos valores excedentes de energia que, por não terem

onde ser armazenados devido a bateria já ter carga suficiente acabou sendo descartada. Um sistema fotovoltaico conectado a rede neste caso poderia proporcionar um melhor aproveitamento da energia.

Contudo o sistema foi dimensionado tendo em vista a época mais crítica do ano, ou seja, o mês de Junho, durante o Inverno, portanto, como os ensaios foram realizados durante o período do Verão, a fim de ser conhecido o comportamento desse sistema também na época crítica cabe a realização de novos ensaios como os vistos neste trabalho.

Durante o período de ensaio, foi visto que o LDR apresentou valores incoerentes com a realidade, uma solução seria sua colocação no meio externo protegido por um domo de vidro, o qual impediria a entrada de água, tendo em vista que o vidro não tem uma degradação com os raios ultravioleta, como ocorre com os polímeros, usados na proteção do LDR neste trabalho.

Um fator importante visto nos protótipos foi que embora na etapa de projeto o sistema de iluminação LED tenha apresentado uma potencia instalada menor, o que se a principio foi visto na prática foi uma demanda maior, que chegou a ultrapassar a estipulada para as cargas de iluminação fluorescente. Contudo, ao vermos as formas de onda da corrente e da tensão de ambas as lâmpadas, se vê que existe uma grande deformação das ondas de corrente vistas quando nas lâmpadas é aplicada uma tensão puramente senoidal. Isto se deve a forma de onda da tensão da saída do inversor ser do tipo senoidal modificada, o que acaba causando no circuito das lâmpadas, em especial da lâmpada LED, uma distorção da forma de onda da corrente. Desta forma, tendo em vista trabalhos futuros, é recomendado um estudo aprofundado sobre os problemas que esta modificação nas ondas de tensão podem ocasionar nas cargas de iluminação, em especial as lâmpadas LED.

Do ponto de vista financeiro, pode-se ressaltar que a economia energética de aproximadamente 7,98 % no sistema fotovoltaico no projeto de iluminação LED, que se refletiu apenas nas baterias, não foi proporcional ao gasto de aquisição com os componentes relativos à iluminação (luminárias e lâmpadas), devido à grande quantidade de lâmpadas necessárias para manter o mesmo nível de iluminância, segundo os parâmetros estudados, assim a diminuição dos custos foi de apenas 4,55 %.

## REFERÊNCIAS

ALTERNATIVE ENERGY STORE. **How Charge Controllers Work**. Disponível em: <<http://www.altestore.com/howto/Solar-Electric-Power/Design-Components/How-Charge-Controllers-Work/a3/>> Acesso em: 15 mai. 2012.

\_\_\_\_\_. **Solar Charge Controllers**. Disponível em: <<http://www.altestore.com/store/Charge-Controllers/Solar-Charge-Controllers/c892/#more>> Acesso em: 16 ago. 2012.

\_\_\_\_\_. **The Role of an Inverter in a Solar Electric System**. Disponível em: <<http://www.altestore.com/howto/Solar-Electric-Power/Getting-Started/The-Role-of-an-Inverter-in-a-Solar-Electric-System/a15/>> Acesso em: 05 ago. 2012.

AMÉRICA DO SOL. **Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <[http://www.americadosol.org/energia\\_fotovoltaica/sistemas-fotovoltaicos/](http://www.americadosol.org/energia_fotovoltaica/sistemas-fotovoltaicos/)>. Acesso em: 20 out. 2012.

ARTEK. **A Lâmpada**. Disponível em: <[http://www.artek.com.br/downloads/historico\\_lampadas.pdf](http://www.artek.com.br/downloads/historico_lampadas.pdf)>. Acesso em: 28 fev. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5382 – Verificação de Iluminância de Interiores**. Rio de Janeiro, 1985.

\_\_\_\_\_. **NBR 5413 – Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 10899 – Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 14298 – Sistemas fotovoltaicos - Banco de baterias - Dimensionamento**. Rio de Janeiro, 1999.

**ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**. PEREIRA, Enio Bueno et. al. 1ª edição. São José dos Campos: INPE, 2006.

BERNARDES, Tereza Cristina. **Lâmpadas Fluorescentes Contém Vapor de Mercúrio.** Disponível em: <[http://www.lixo.com.br/index.php?option=com\\_content&task=view&id=149&Itemid=273](http://www.lixo.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=149&Itemid=273)> Acesso em: 23 out. 2012.

BLUESOL ENERGIA SOLAR. **Energia Solar: Como Funciona? – Tipos de Células Fotovoltaicas.** Jan. 2012. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 16 dez.2012a.

BLUESOL ENERGIA SOLAR. **Sistemas Fotovoltaicos.** Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/index.php/sistemas-fotovoltaicos>>. Acesso em: 20 out. 2012b.

BOCCHI, Nerils; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. **Pilhas e Baterias:** Funcionamento e Impacto Ambiental. Mai. 2000. Disponível em: <<http://www.qnesc.s bq.org.br/online/qnesc11/v11a01.pdf>> Acesso em: 17 out. 2012.

BURGOS ELETRÔNICA. **Tipos de LEDs.** Disponível em: <<http://www.burgoseletronica.net/ledstipos.jpg>> Acesso em: 29 jun. 2012.

CARNEIRO, J. **Módulos Fotovoltaicos: Características e Associações.** Notas de aula da disciplina Eletromagnetismo B, do 2º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho. Guimarães: 2010. Disponível em: <[http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos\\_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%C3%B3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%C3%A7%C3%B5es.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2013.

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA. **Pilha de Volta.** Disponível em: <[http://efisica.if.usp.br/electricidade/basico/pilha/pilha\\_volta/](http://efisica.if.usp.br/electricidade/basico/pilha/pilha_volta/)> Acesso em: 12 out. 2012.

CHAN, L. M. **Modelo SM50.** Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/luischan/>>. Acesso em: 15 out. 2012.

CLARITEK. **ILUMINAÇÃO LED.** Disponível em: <[http://www.claritek.com.br/pdf/iluminacao\\_led.pdf](http://www.claritek.com.br/pdf/iluminacao_led.pdf)> Acesso em: 26 mar. 2012.

CORRÊA, Rafael. **Uma revolução no domínio da luz: Novas células solares abrem caminho para a era da energia farta, barata e renovável.** Edição 1992. Revista Veja on-line: Abril, 2007. Disponível em: <[http://veja.abril.com.br/240107/p\\_066.html](http://veja.abril.com.br/240107/p_066.html)>. Acesso em: 03 set. 2011.

COSTA, Claudia. **Descarte de Lâmpadas – Uma idéia luminosa!**. 20 out. 2007. Disponível em: <<http://ecoamigos.wordpress.com/2007/10/20/descarte-de-lampadas-uma-ideia-luminosa/>> Acesso em: 23 out. 2012.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações.** CRESESB, 2006. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf) >. Acesso em: 15 out. 12.

\_\_\_\_\_. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar – CTES. Edição Especial PRC-PRODEEM. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004.

DOMOSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaico: Vantagens e Desvantagens?** 4 mai. 2011. Disponível em: <<http://www.domosolar.net/domotica/energia-solar-fotovoltaico-vantagens-e-desvantagens/>> Acesso em: 30 mai. 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos.** Série: Estudos de Energia. Nota Técnica DEA15/09. Rio de Janeiro: dez. 2009. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20091222\\_2.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20091222_2.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2011.

ENERGIA PURA. **Controlador de Carga FlexMax MPPT 60A.** Disponível em: <<https://www.energiapura.com/content/controlador-de-carga-flexmax-mppt-60a>> Acesso em: 19 mar.2013

FERREIRA, Rodrigo Arruda Felício. **Manual de Luminotécnica.** 2010. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ramoieee/files/2010/08/Manual-Luminotecnica.pdf>> Acesso em: 02 out. 2012.

FIGUEIREDO, M. A. G.; ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F.A. **A história do CO<sub>2</sub> nos processos de mudanças climáticas globais.** Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium, Ituiutaba, v. 3, n. 2, p. 408-418, jul./dec. 2012. Disponível em:

<<http://www.seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/17351/11226>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

FÓRUM DA CONSTRUÇÃO. **Iluminação residencial com Leds**. IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, Fórum da Construção. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=3&Cod=988>> Acesso em: 29 jun. 2012.

FRACCHETTA, Alexandre. **Cuidados no descarte de lâmpadas queimadas: fluorescente x incandescente x led**. IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, Fórum da Construção. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=3&Cod=675>> Acesso em: 26 mai. 2012.

FREE SUN POWER. **Basic Tutorials: Charge Controllers**. Disponível em: <<http://www.freesunpower.com/chargecontrollers.php>> Acesso em: 19 mai. 2012.

FRONIUS, **História da Bateria**. Disponível em: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-39209001-0D268A57/fronius\\_brasil/hs.xsl/45\\_439.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-39209001-0D268A57/fronius_brasil/hs.xsl/45_439.htm)> Acesso em: 18 out. 2012.

GALDINO, M. A. **Análise de Custos Históricos de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo: set. 2012. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/artigo/IV-CBENS/Artigo\\_custos\\_historicos\\_IVCBENS.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/artigo/IV-CBENS/Artigo_custos_historicos_IVCBENS.pdf)> Acesso em: 13 fev. 2013.

GILL, N. S. **The Very First Known Battery: The Baghdad Battery**. Disponível em: <<http://ancienthistory.about.com/od/sciencemedicine/qt/1stBattery.htm>> Acesso em: 07 out. 2012.

GRACIELA, **Descarte correto de Lâmpadas Fluorescentes**. 02 mar. 2012. Disponível em: <<http://cigres.blogspot.com.br/2012/03/descarte-correto-de-lampadas.html>> Acesso em: 23 out. 2012.

HALCO LIGHTING TECHNOLOGIES. **About LED Lighting**. 19 fev. 2010. Disponível em: <<http://www.halcolighting.com/pdf/educ/LED-White-Paper.pdf>> Acesso em: 20 mar. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2000**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/universo.php?tipo=31o/tabela13\\_1.shtm&paginaatual=1&uf=41&letra=C](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/universo.php?tipo=31o/tabela13_1.shtm&paginaatual=1&uf=41&letra=C)>. Acesso em: 15 set. 2011.

\_\_\_\_\_. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=410690>>. Acesso em: 15 set. 2011.

INSTITUTO TÉCNICO DE LISBOA. Disponível em: <<http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>>. Acesso em: 12 set. 2011.

ITAIM. **Catálogo geral de produtos - 2005**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/17383792/Catalogo-Itaim-Iluminacao-2005>>. Acesso em: 09 dez. 2012.

ITAIM. **Catálogo geral de produtos - 2008**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/2514046/itaim-catalogo-2008>>. Acesso em: 09 dez. 2012.

KAWASAKI, Juliana Iwashita. Sistemas de iluminação: Métodos de cálculo luminotécnico. **O Setor Elétrico**, 74. ed, mar. 2012. Disponível em: <[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed74\\_fasc\\_sistemas\\_iluminacao\\_cap3.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed74_fasc_sistemas_iluminacao_cap3.pdf)> Acesso em: 15 dez. 2012.

KRÜGER, Tabitha Von. **LEDs – Campeões da iluminação sustentável**. IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, Fórum da Construção. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=3&Cod=897>> Acesso em: 29 jun. 2012.

LED NEWS. **Quanto tempo dura uma lâmpada LED?**. 30 ago. 2011. Disponível em: <<http://lednews.com.br/video/quanto-tempo-dura-uma-lampada-led/>> Acesso em: 30 abr. 2012.

LEDSLIFE. **Lâmpadas de Alto Brilho**. Disponível em: <<http://www.ledslife.com/produtos/white-light-panel/leds/led-alto-brilho/>> Acesso em: 30 mar. 2012.

LEDLIFE. **Lâmpadas de Led Retrofit.** Disponível em:  
<<http://www.ledslife.com/produtos/iluminacao-funcional-e-decorativa/leds-retrofit/>>  
Acesso em: 30 jun. 2012.

LUZ, Jeanine Marchiori da. **Luminotécnica.** Disponível em:  
<<http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/Luminotecnica.pdf>> Acesso em: 10 out. 2012.

MEHL, Ewaldo L. M. **Circuitos Elétricos I.** Disponível em:  
<<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/circuitos-cap1.pdf>> Acesso em: 11 out. 2012.

MELLO, Rose Elizabeth. **Projetando com LEDs.** IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura, Fórum da Construção. Disponível em:  
<<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=3&Cod=1005>> Acesso em: 30 jun. 2012.

MINHA CASA SOLAR. **Controlador de Carga e Descarga.** Disponível em:  
<<http://www.minhacasasolar.com.br/saiba-controlador.php>> Acesso em: 19 mai.2012.

\_\_\_\_\_. **Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 230W Tecnometal – SV-230D12.** Disponível em:  
<<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,IDLoja,14743,IDProduto,3780818,painel-solar-fotovoltaico-painel-de-205w-a-260w-painel-solar-fotovoltaico-policristalino-de-230w-tecnometal---sv-230d12>> Acesso em: 25 fev.2013a.

\_\_\_\_\_. **Inversor de Energia de 1000W Loud - 24V/110V.** Disponível em:  
<<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,IDLoja,14743,IDProduto,3797441,inversor-de-tensao-inversor-24v-para-110v-inversor-de-energia-de-1000w-loud---24v-110v>> Acesso em: 19 mar.2013b.

MSPC. **Pilhas e baterias I-30.** Disponível em:  
<<http://www.mspc.eng.br/tecdiv/bat130.shtml>> Acesso em: 20 out. 2012.

NETTO, Luiz Ferraz. **A lâmpada fluorescente.** Disponível em:  
<[http://www.feiradeciencias.com.br/sala14/14\\_19.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala14/14_19.asp)> Acesso em: 20 out. 2012

OSRAM DO BRASIL. **Manual Luminotécnico Prático da OSRAM**. Disponível em: <[http://www.feelt.ufu.br/pastas/EID/3.42\\_\\_\\_Manual\\_Luminotecnico\\_Pratico\\_OSRAM\\_\(2000\).pdf](http://www.feelt.ufu.br/pastas/EID/3.42___Manual_Luminotecnico_Pratico_OSRAM_(2000).pdf)> Acesso em: 10 jun. 2012.

OSRAM DO BRASIL. **Orientação quanto ao descarte de lâmpadas**. Disponível em: <[http://www.osram.com.br/osram\\_br/Sobre\\_a\\_OSRAM/Sociedade\\_e\\_meio\\_ambiente/Produtos\\_OSRAM\\_e\\_o\\_meio\\_ambiente/Orientacao\\_quanto\\_ao\\_descarte\\_de\\_lampadas/index.html](http://www.osram.com.br/osram_br/Sobre_a_OSRAM/Sociedade_e_meio_ambiente/Produtos_OSRAM_e_o_meio_ambiente/Orientacao_quanto_ao_descarte_de_lampadas/index.html)> Acesso em: 23 out. 2012.

PAINÉIS FOTOVOLTAICOS. **Painéis Fotovoltaicos Vantagens e Desvantagens**. Disponível em: <<http://paineis-fotovoltaicos.org/paineis-fotovoltaicos-vantagens-e-desvantagens>> Acesso em: 05 abr. 2012.

PERLUZ. **Breve introdução aos LED's**. Disponível em: <<http://www.perluz.com/>> Acesso em: 26 jun. 2012.

PHILIPS DO BRASIL. **Lâmpadas LED Philips: Eficiência e Longa Durabilidade**. Mai. 2010. Disponível em: <[http://www.lighting.philips.com.br/pwc\\_li/br\\_pt/application\\_areas/assets/Broadside\\_MASTER\\_LED\\_FINAL.pdf](http://www.lighting.philips.com.br/pwc_li/br_pt/application_areas/assets/Broadside_MASTER_LED_FINAL.pdf)> Acesso em: 21 jun. 2012.

\_\_\_\_\_. **Philips lança lâmpada LED para iluminação residencial**. 30 set. 2010. Disponível em: <[http://www.newscenter.philips.com/br\\_pt/standard/about/news/press/article-201010062.wpd](http://www.newscenter.philips.com/br_pt/standard/about/news/press/article-201010062.wpd)> Acesso em: 12 mai. 2012.

PHILIPS. **Guia de Compras: LED**. Ago. 2011. Disponível em: <[http://www.lighting.philips.com.br/pwc\\_li/br\\_pt/lightcommunity/assets/guia\\_de\\_compras\\_a4\\_seq.pdf](http://www.lighting.philips.com.br/pwc_li/br_pt/lightcommunity/assets/guia_de_compras_a4_seq.pdf)>. Acesso em: 06 mar. 2013.

\_\_\_\_\_. **Guia Prático Philips Iluminação**. Nov.2009. Disponível em: <[http://www.lighting.philips.com.br/pwc\\_li/br\\_pt/connect/Assets/pdf/GuiaBolso\\_Sistema\\_09\\_final.pdf](http://www.lighting.philips.com.br/pwc_li/br_pt/connect/Assets/pdf/GuiaBolso_Sistema_09_final.pdf)> Acesso em: 19 mar. 2013

\_\_\_\_\_. **MASTER LED bulb - MASTER LED bulb 9-60W E27 6500K 100-240V A60.15** Mar.2013. Disponível em: <[http://download.p4c.philips.com/l4b/9/929000199110\\_eu/929000199110\\_eu\\_pss\\_a\\_en.pdf](http://download.p4c.philips.com/l4b/9/929000199110_eu/929000199110_eu_pss_a_en.pdf)> Acesso em: 19 mar. 2013

\_\_\_\_\_. **MASTER LEDtube GA - MASTER LEDtube GA300 1200mm 22W 840 C.16** **Mar.2013.** Disponível em: <[http://download.p4c.philips.com/l4b/9/929000292902\\_eu/929000292902\\_eu\\_pss\\_a\\_en.pdf](http://download.p4c.philips.com/l4b/9/929000292902_eu/929000292902_eu_pss_a_en.pdf)> Acesso em: 19 mar. 2013

\_\_\_\_\_. **Technical Application Guide for PHILIPS LED Lamps - PHILIPS 120V EnduraLED 12.5W A19 2700K Dimmable.Jul.2010.** Disponível em: <[http://www.usa.lighting.philips.com/pwc\\_li/us\\_en/connect/tools\\_literature/downloads/EnduraLED\\_A19-110726\\_2.pdf](http://www.usa.lighting.philips.com/pwc_li/us_en/connect/tools_literature/downloads/EnduraLED_A19-110726_2.pdf)> Acesso em: 19 mar. 2013

PINHO, J. T.; ZILLES, R. **Energia Solar Fotovoltaica.** Painel INTC, 2011. Disponível em: <<http://www.fotovoltaica.ufsc.br/downloads>>. Acesso em: 21 out. 2012.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL, **Manual de Aplicação dos Regulamentos: RTQ-C e RAC-C.** Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAenfcAL/manual-rtq-c-rac-c>> Acesso em: 10 jan. 2012.

PRYSMIAN. **Baixa Tensão: Uso Geral – Dimensionamento.** Disponível em: <<http://www.prysmian.com.br/export/sites/prysmian-ptBR/energy/pdfs/Dimensionamento.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2013.

RANGEL, Marcelle G.; SILVA, Paula B.; GUEDE, José R. A. **LED: Iluminação de Estado Sólido.** São José dos Campos: 2009. Disponível em: <[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2009/anais/arquivos/0508\\_0224\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2009/anais/arquivos/0508_0224_01.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2011.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil.** Florianópolis: LABSOLAR, 2004. Disponível em: <<http://www.fotovoltaica.ufsc.br/downloads>> Acesso em: 10 out.2012.

SALES, Roberto Pereira. **Led, o novo paradigma da iluminação pública.** 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia – PRODETEC, Curitiba, 2011.

SATVEZ. **Energia Fotovoltaica.** Disponível em: <[http://www.satvez.pt/web/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5&Itemid=9](http://www.satvez.pt/web/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=9)> Acesso em: 05 abr. 2012.

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO BÁSICA. **Química: ensino médio.** Brasília, Ministério da Educação, 2006. Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/EnsMed/expensqui\\_vol5.pdf](http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/EnsMed/expensqui_vol5.pdf)> Acesso em: 13 out. 2012.

SERRANO, Daniel. **LED já substitui lâmpadas comuns.** Planet Tech, 6 mai. 2009. Disponível em: <<http://planetech.uol.com.br/2009/05/06/led-mais-eficiente-ja-substitui-lampadas-comuns/>> Acesso em: 26 mai. 2012.

SILVA, Benjamim Góis Ildfonso da. **Sistemas de fornecimento de energia ininterrupta - UPS.** 12 fev. 2010. Guia do Hardware. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/tutoriais/jubarte/pagina10.html>> Acesso em: 17 out. 2012.

SOARES, Giovane Gai; RECH, Cassiano. **Metodologia de Dimensionamento de um Gerador Fotovoltaico para Sistemas Autônomos.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Departamento de Tecnologia – DETEC, Curso de Engenharia Elétrica, Ijuí. 2012.

SOLELUX. **Conceitos Básicos.** Disponível em: <<http://www.solelux.com.br/tecnologia-led/conceitos-basicos/>> Acesso em: 27 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **Economia.** Disponível em: <<http://www.solelux.com.br/tecnologia-led/economia/>> Acesso em: 27 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **História do LED.** Disponível em: <<http://www.solelux.com.br/tecnologia-led/historia-do-led/>> Acesso em: 27 abr. 2012.

\_\_\_\_\_. **Principais Vantagens do LED.** Disponível em: <<http://www.solelux.com.br/tecnologia-led/vantagens-e-beneficios-saving/>> Acesso em: 27 abr. 2012.

TRIPOD. **Lâmpadas Fluorescentes.** Disponível em: <<http://alkimia.tripod.com/lampadas.htm>> Acesso em: 09 out. 2012.

U. S. CENSUS BUREAU. **Internacional Data Base**. Jun. 2011. Disponível em: <<http://www.census.gov/population/international/data/idb/worldpopgraph.php>>. Acesso em: 329 set. 2011.

URBANETZ JUNIOR, Jair. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos E Dimensionamentos De Sistemas**. Curso promovido pela UTFPR. Curitiba: out. 2012.

VIRTUE SCIENCE. ***BaghdadBattery***. Disponível em: <<http://www.virtuescience.com/baghdad-battery.html>> Acesso em: 08 out. 2012.

YOMACAMA. **Sobre Led**. Disponível em: <<http://www.painelsolarbrasil.com/SobreLed.html>> Acesso em: 16 mai. 2012.

## APÊNDICES

APÊNDICE A – Imagens relacionadas aos ensaios dos protótipos

QUARTO 1 – CÔMODO DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO



Figura 79 – Visão do Quarto 1 sob ensaio lâmpadas LED- vista sudeste.  
Fonte: Autoria própria.



Figura 80 – Visão do Quarto 1 sob ensaio lâmpadas LED- vista sudoeste.  
Fonte: Autoria própria.

## PAINEL FOTOVOLTAICO INSTALADO



Figura 81 - Painel fotovoltaico instalado no telhado da residência.  
Fonte: Autoria própria.

## LÂMPADAS LED



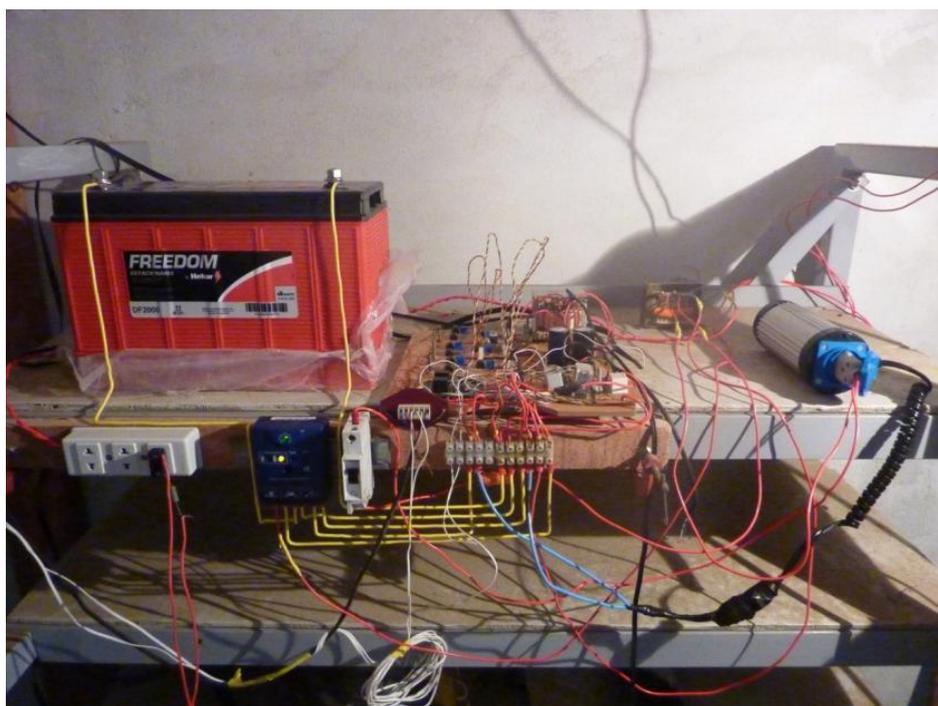
Figura 82 - Suporte construído para as lâmpadas e sua disposição - Lâmpadas LED (a) desligadas e (b) ligadas.  
Fonte: Autoria própria.

## LÂMPADAS FLUORESCENTES



**Figura 83 – Suporte com as lâmpadas fluorescentes.**  
Fonte: Autoria própria.

#### DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NO SOTÃO



**Figura 84 - Vista frontal do lay out dos equipamentos.**  
Fonte: Autoria própria.

#### SISTEMA DE MONITORAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

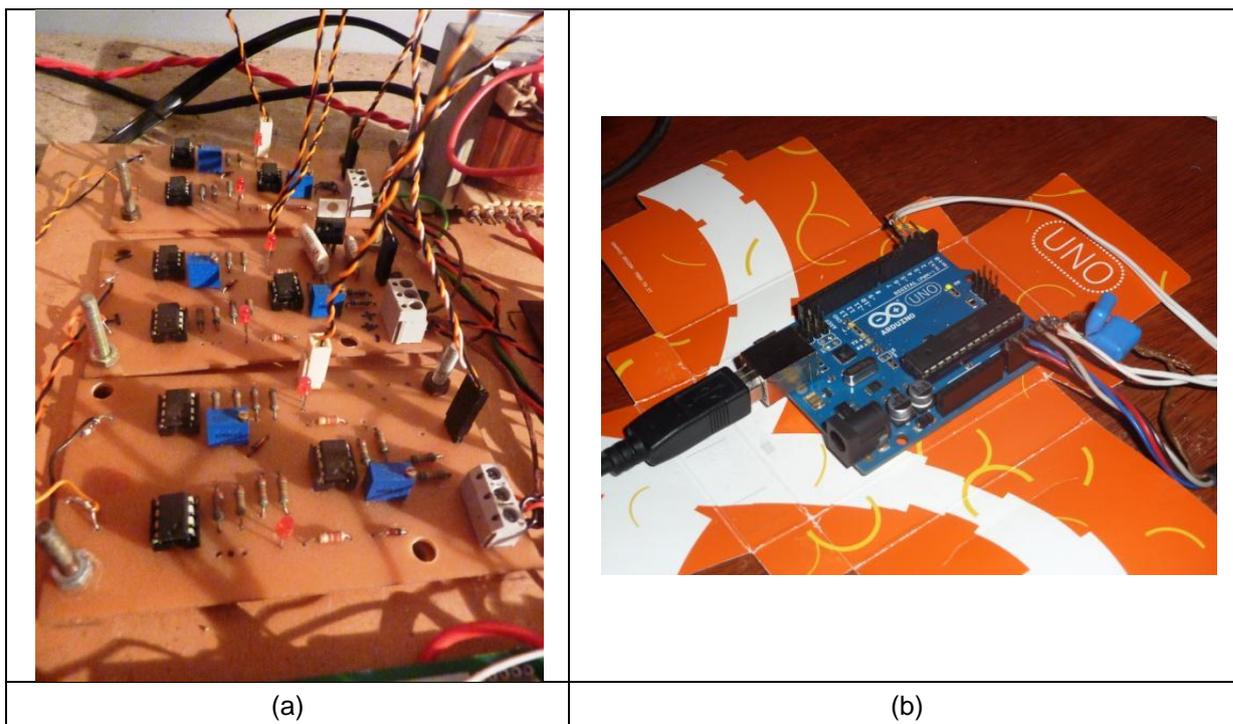


Figura 85 - (a)Placas do circuito de coleta de dados (b) Arduino  
Fonte: Autoria própria.

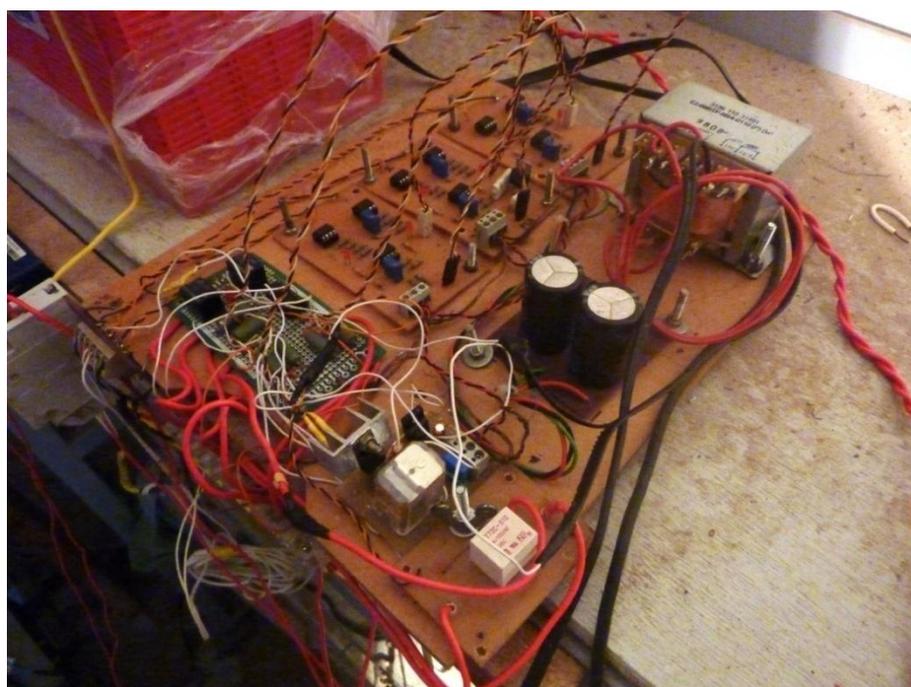


Figura 86 - Visão geral do mecanismo de coleta de dados e comutação.  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 87 - Visão da interface do programa de monitoramento do sistema fotovoltaico.**  
**Fonte: Autoria própria.**

APÊNDICE B – Formas de onda da corrente e tensão nas lâmpadas fluorescente e LED e transformadas rápidas de Fourier das correntes

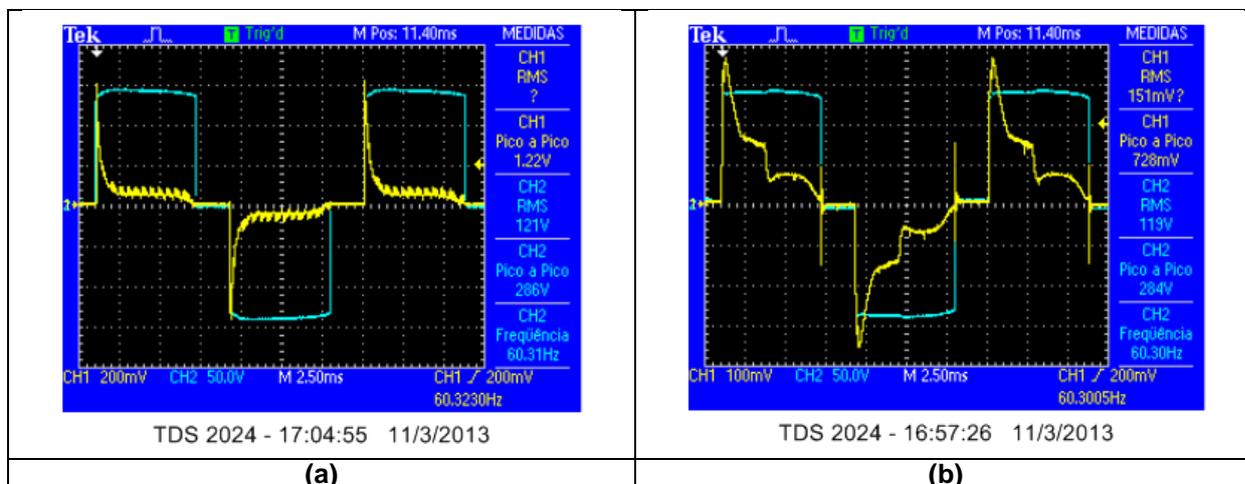


Figura 88 - Formas de onda da corrente e da tensão com o inversor (a) fluorescentes e (b) LED. Fonte: Autoria própria.

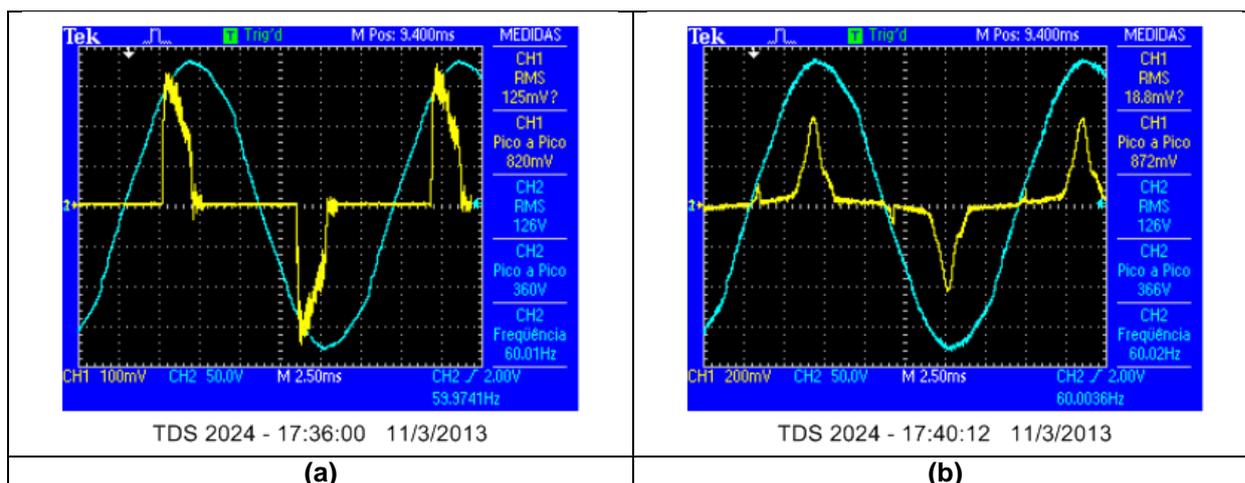


Figura 89 - Formas de onda da corrente e da tensão com a rede (a) fluorescentes e (b) LED. Fonte: Autoria própria.

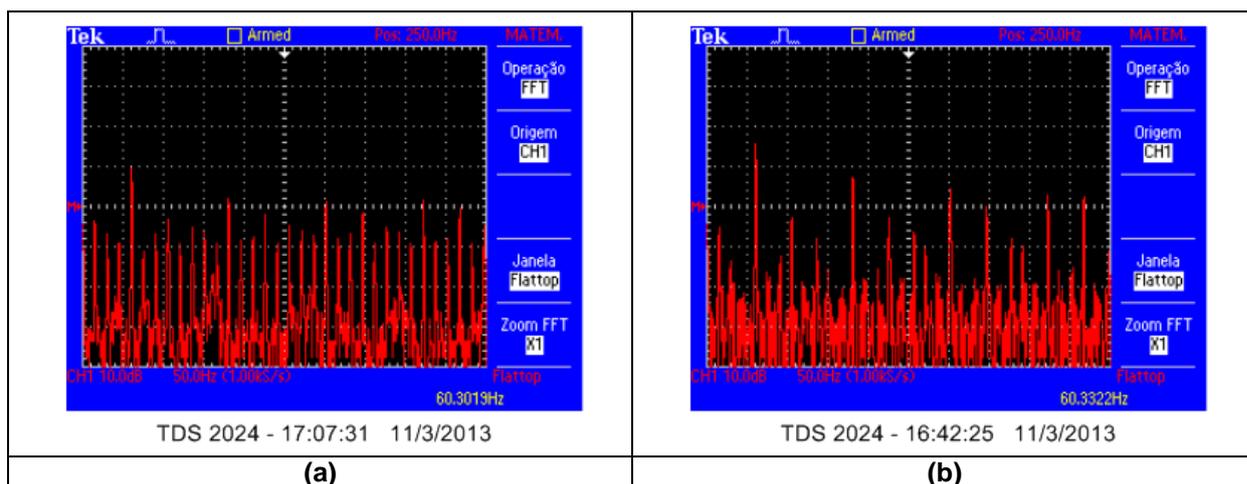


Figura 90 – FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 50 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.  
Fonte: Autoria própria.

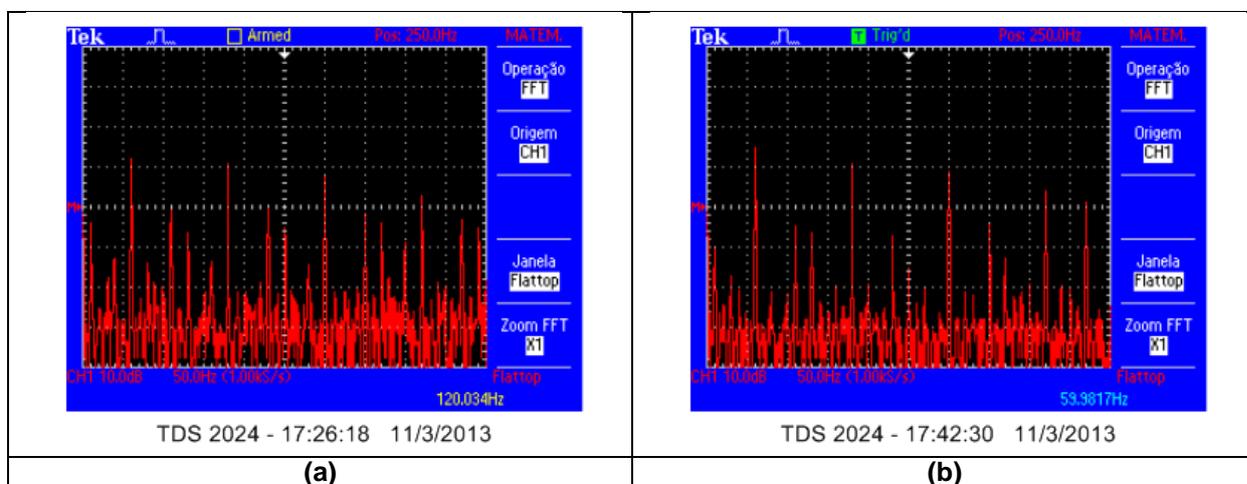


Figura 91 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 50 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.  
Fonte: Autoria própria.

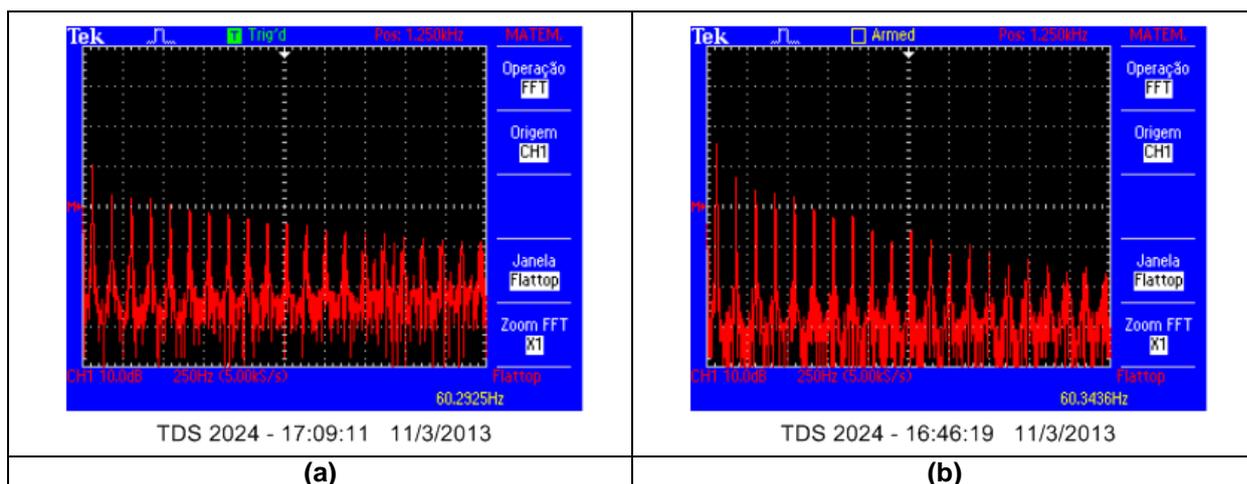


Figura 92 – FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 250 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.

Fonte: Autoria própria.

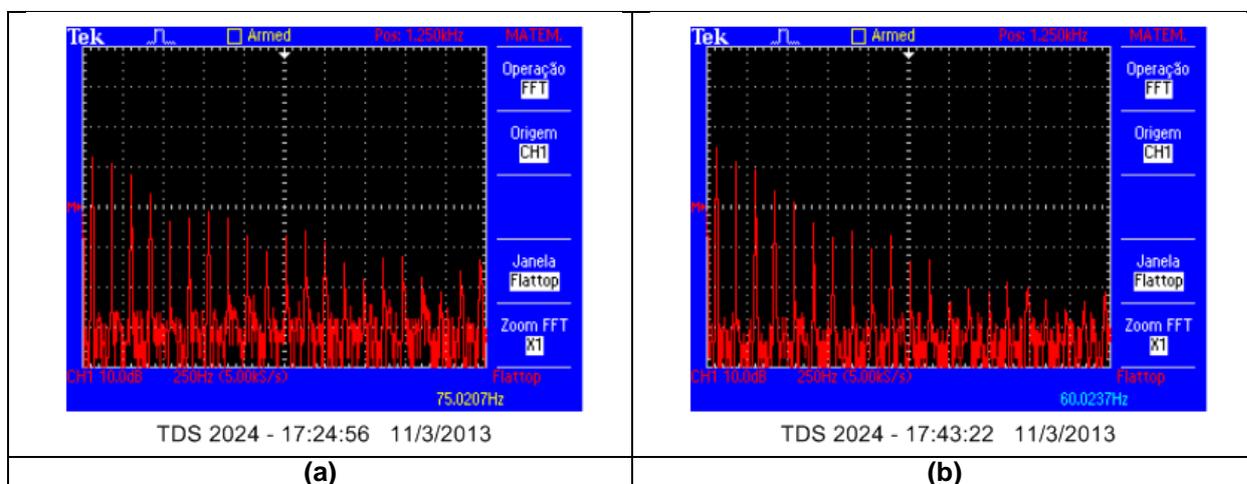


Figura 93 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 250 Hz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.

Fonte: Autoria própria.

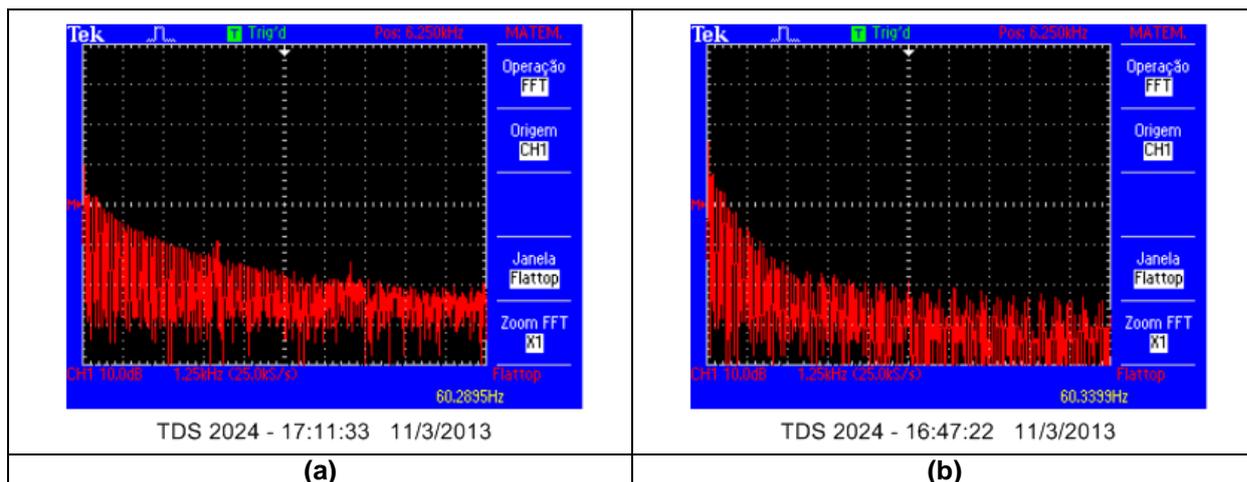


Figura 94 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 1,25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.

Fonte: Autoria própria.

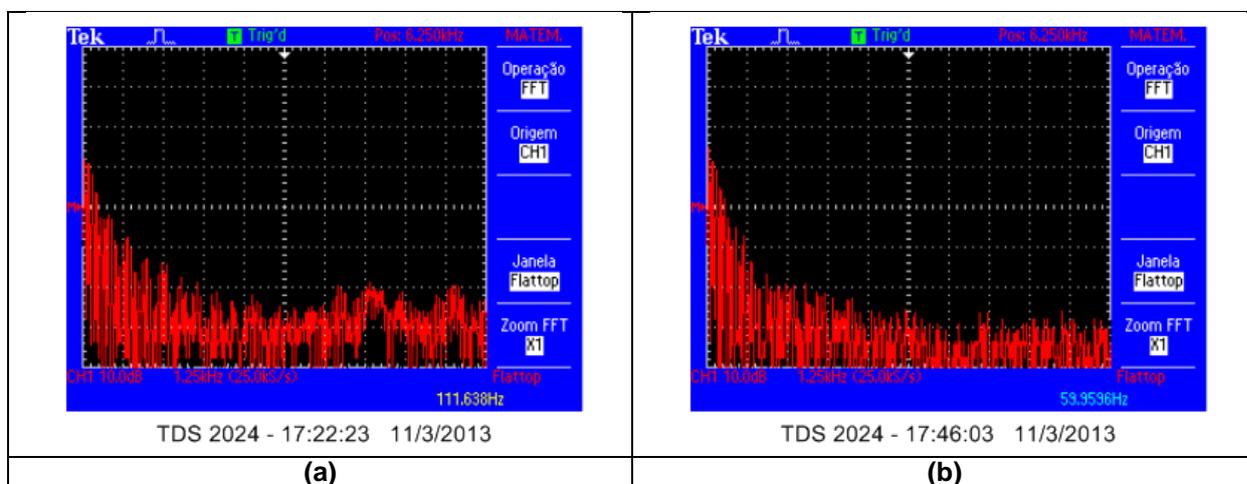


Figura 95 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 1,25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.

Fonte: Autoria própria.

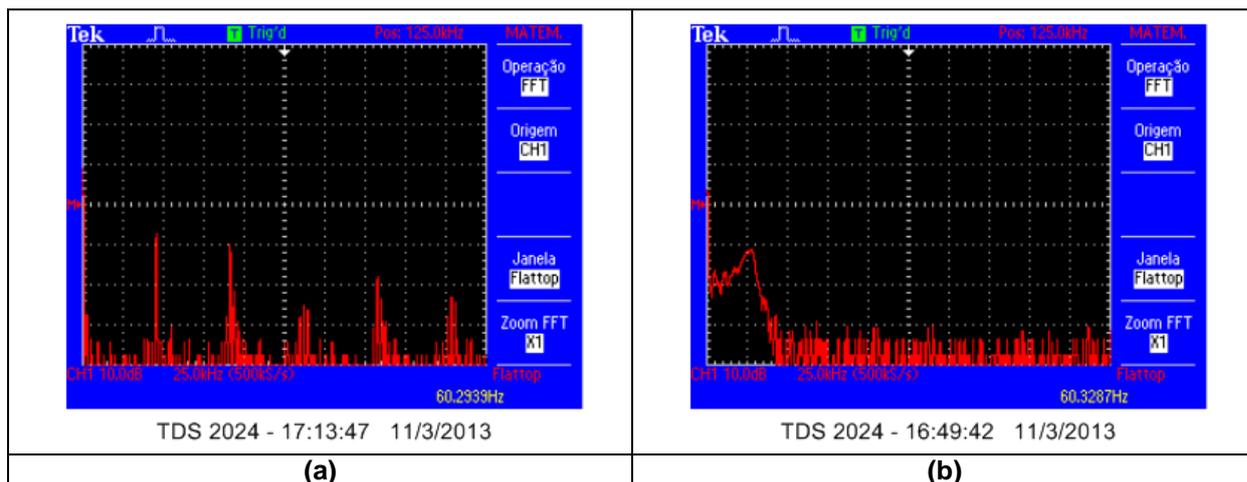


Figura 96 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com o inversor com divisões de 25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.

Fonte: Autoria própria.

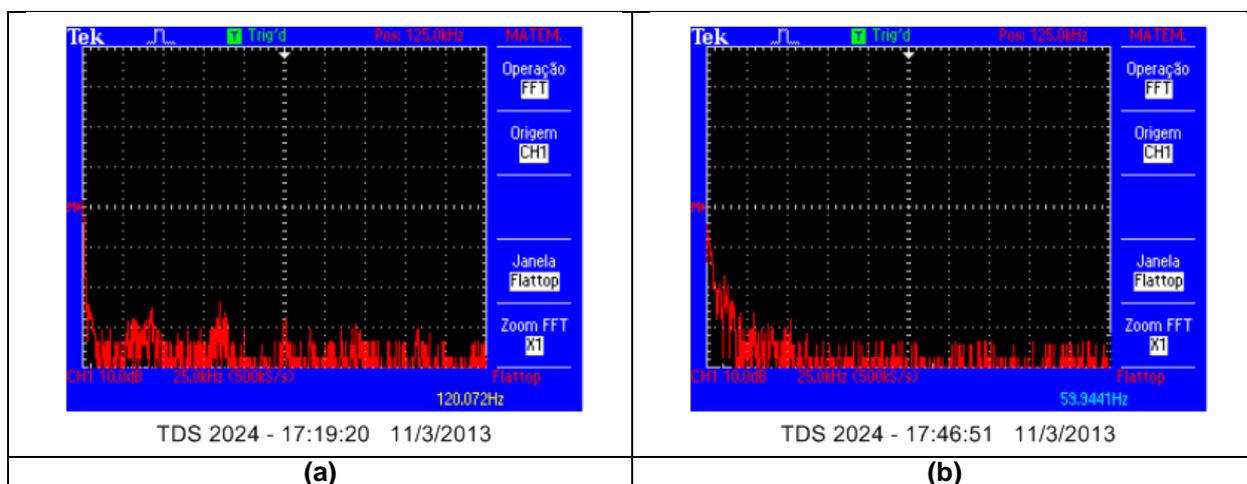


Figura 97 - FFT (Transformadas rápida de Fourier) da corrente com a rede elétrica com divisões de 25 kHz para as lâmpadas (a) fluorescentes e (b) LED.

Fonte: Autoria própria.

## ANEXOS

### ANEXO A - Coeficiente de Reflexão de Alguns Materiais e Cores

<b>Materiais</b>	<b>%</b>
Rocha	60
Tijolos	5..25
Cimento	15..40
Madeira clara	40
Esmalte branco	65..75
Vidro transparente	6..8
Madeira aglomerada	50..60
Azulejos brancos	60..75
Madeira escura	15..20
Gesso	80
<b>Cores</b>	<b>%</b>
Branco	70..80
Creme claro	70..80
Amarelo claro	55..65
Rosa	45..50
Verde claro	45..50
Azul celeste	40..45
Cinza claro	40..45
Bege	25..35
Amarelo escuro	25..35
Marrom claro	25..35
Verde oliva	25..35
Laranja	20..25
Vermelho	20..35
Cinza médio	20..35
Verde escuro	10..15
Azul escuro	10..15
Vermelho escuro	10..15
Cinza escuro	10..15
Azul marinho	5..10
Preto	5..10

**Fonte: OSRAM DO BRASIL, (2012)**

ANEXO B – Níveis de iluminância por tipo de atividade para residências e escritórios.  
Extraído da norma NBR 5413 – Iluminância de interiores.

#### 5.3.14 Escritórios

- Escritórios de:
  - Registros, cartografia, etc.: (750 - 1000 – 1500);
  - Desenho, engenharia mecânica e arquitetura: (750 - 1000 -1500);
  - Desenho decorativo e esboço: (300 - 500 – 750).

#### 5.3.65 Residências:

- Salas de estar:
  - Geral: (100 – 150 – 200);
  - Local (leitura, escrita, bordado,etc.): (300 – 500 – 750).
- Cozinhas:
  - Geral: (100 – 150 – 200);
  - Local (fogão, pia, mesa) (200 – 300 – 500).
- Quartos de dormir:
  - Geral: (100 – 150 – 200);
  - Local (espelho, penteadeira, cama): (200 – 300 – 500).
- Hall, escadas, despensas, garagens:
  - Geral: (75 – 100 – 150);
  - Local: (200 – 300 – 500).
- Banheiros:
  - Geral: (100 – 150 – 200);
  - Local (espelhos): (200 – 300 – 500).

ANEXO C – Níveis de iluminância por classe de tarefas visuais. Extraído da norma NBR 5413 – Iluminância de interiores.

Classe	Iluminância (lux)	Tipo de atividade
A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	20 - 30 - 50	Áreas públicas com arredores escuros
	50 - 75 - 100	Orientação simples para permanência curta
	100 - 150 - 200	Recintos não usados para trabalho contínuo; depósitos
	200 - 300 - 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios
B Iluminação geral para áreas de trabalho	500 - 750 - 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios
	1000 - 1500 - 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual inspeção, indústria de roupas.
C Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 - 3000 - 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno
	5000 - 7500 - 10000	Tarefas visuais muito exatas, montagem de microeletrônica
	10000 - 15000 - 20000	Tarefas visuais muito especiais, cirurgia

**Quadro 1 - Iluminância por classe de tarefas visuais.**

**Fonte: ABNT, (1992).**

ANEXO D – Método de escolha da iluminância por tipo de atividade e por classe de tarefas. Extraído da norma NBR 5413 – Iluminância de interiores.

O valor de iluminância por tipo de atividade deve ser escolhido da seguinte maneira:

- Considerar o valor do meio, devendo este ser utilizado em todos os casos.
- O valor mais alto de iluminância deve ser usado quando:
  - a) a tarefa se apresenta com refletâncias e contrastes bastante baixos;
  - b) erros são de difícil correção;
  - c) o trabalho visual é crítico;
  - d) alta produtividade ou precisão são de grande importância;
  - e) a capacidade visual do observador está abaixo da média.
- O valor mais baixo de iluminância pode ser usado quando:
  - a) refletâncias ou contrastes são relativamente altos;
  - b) a velocidade e/ou precisão não são importantes;
  - c) a tarefa é executada ocasionalmente.

O procedimento para determinar a iluminância por classe de tarefas adequada segue os critérios descritos no item 5.2.2 da norma NBR 5413:

- a) analisar cada característica para determinar o seu peso (-1, 0 ou +1);
- b) somar os três valores encontrados, algebricamente, considerando o sinal;
- c) usar a iluminância inferior do grupo, quando o valor total for igual a -2 ou -3; a iluminância superior, quando a soma for +2 ou +3; e a iluminância média, nos outros casos.

Características da tarefa e do observador	Peso		
	-1	0	+1
Idade	Inferior a 40 anos	40 a 55 anos	Superior a 55 anos
Velocidade e precisão	Sem importância	Importante	Crítica
Refletância do fundo da tarefa	Superior a 70 %	30 a 70 %	Inferior a 30 %

**Quadro 2 - Fatores determinantes da iluminância adequada.**

Fonte: ABNT, (1992).

## ANEXO E – Especificações e características das luminárias usadas no projeto.

## LUMINÁRIA 3740

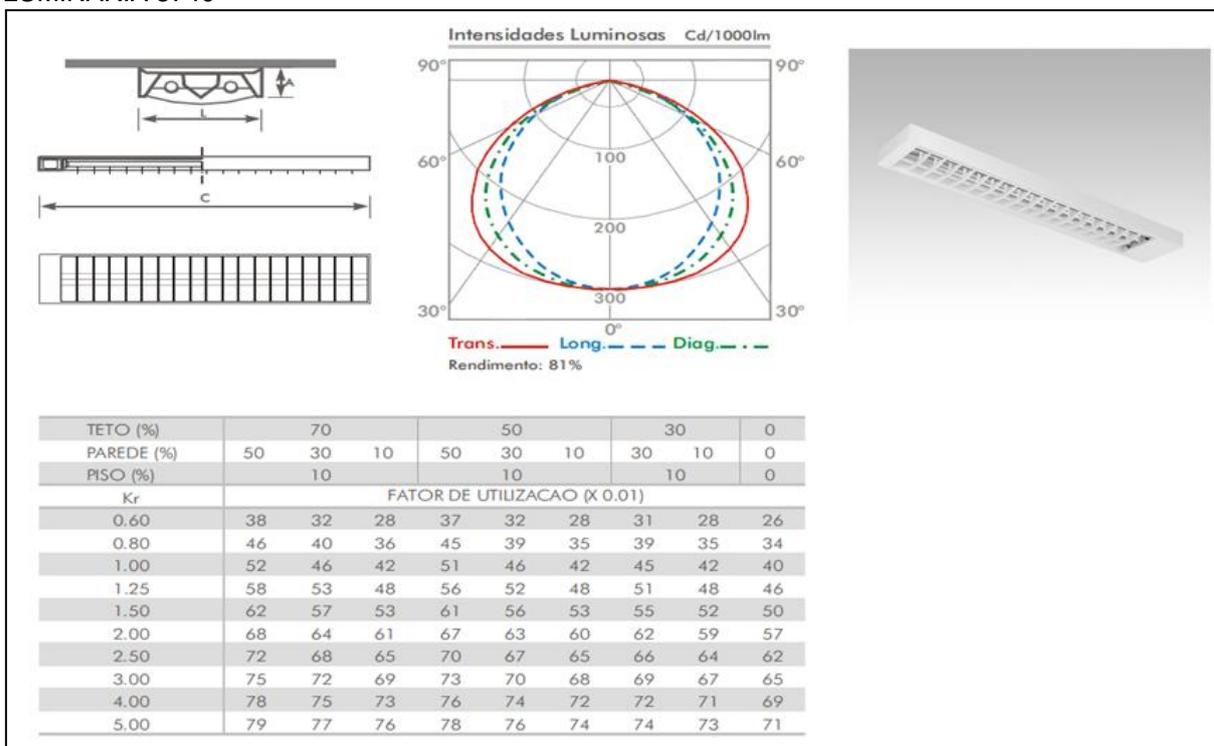


Figura 98 - Especificações luminária 3740

Fonte: adaptado de Catálogo geral de produtos ITAIM (2005).

## LUMINÁRIA RUBI

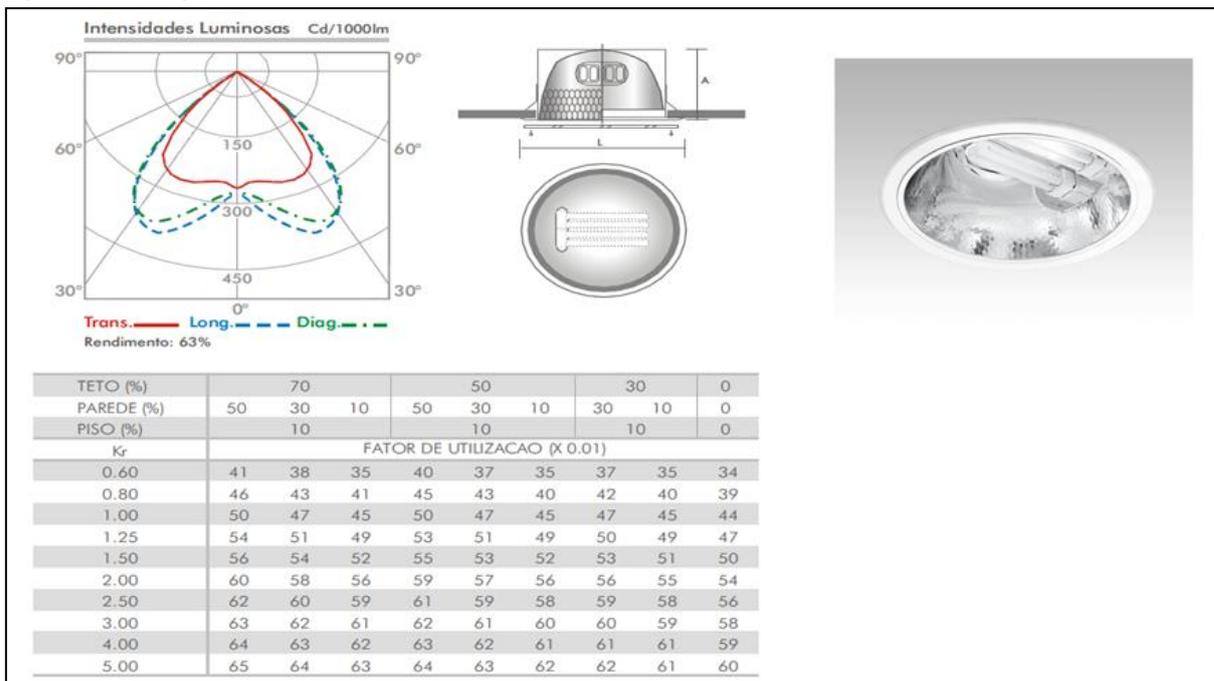


Figura 99 - Especificações luminária Rubi

Fonte: adaptado de Catálogo geral de produtos ITAIM (2005).

ANEXO F – Equipamentos usados no sistema fotovoltaico para iluminação residencial fluorescente e LED

Tabela 43 – Especificações do painel fotovoltaico usado para os sistemas fotovoltaicos de iluminação fluorescente e LED

<b>Especificação do painel fotovoltaico</b>	
Marca	Tecnometal
Modelo	SV-230D12
Potência máxima [Wp] *	230
Corrente em potência máxima [A] *	7,67
Tensão em potência máxima [V] *	30,0
Corrente de curto-circuito [A] *	8,36
Tensão de circuito aberto [V] *	36,0
Capacidade média de geração [Ah/dia] **	192,5
Dimensões (C x L x A) [mm]	1645 x 981 x 34
Peso [kg]	16,4

Fonte: MINHA CASA SOLAR (2013b).

Tabela 44 - Especificações do controlador de carga usado para os sistemas fotovoltaicos de iluminação fluorescente e LED

<b>Especificação do controlador de carga</b>	
Marca	OutBack
Modelo	FlexMax MPPT 60 <sup>a</sup>
Tensão nominal [Vdc]	12, 24, 36, 48 ou 60
Máxima corrente da carga [A]	60
Tensão de equalização [Vdc]	Regulável
Tensão de carga [Vdc]	Regulável
Tensão de flutuação [Vdc]	Regulável
Tensão mínima de desconexão (LVD)	Regulável
Tensão de reconexão da carga	Regulável
Compensação de temperatura	5,0 mV por °C por célula de bateria 2 V
Temperatura de operação [°C]	-40 ~ 60
Dimensões [cm]	46 x 30 x 20
Peso [kg]	5,3

Fonte: ENERGIA PURA (2013).

Tabela 45 - Especificações do inversor usado para os sistemas fotovoltaicos de iluminação fluorescente e LED

Especificação do inversor		
Marca		Hayonik
Modelo		SCD12/24 – 15
Potência nominal [W]		1000
Saída	Potência de pico [W]	1200
	Frequência [Hz]	60 ± 3 Hz
	Regulagem de AC [%]	± 10
	Tensão AC [Vca]	110
	Onda de tensão	Senoidal modificada
	Consumo de corrente [A]	< 0,35
Entrada	Tensão DC [Vcc]	24
	Gama de tensões [Vcc]	22 a 30
	Eficiência [%]	≥ 80
Proteção	Desligamento de bateria [V]	18,4/19,6
	Sobrecarga [W]	>1200
	Sobretensão [V]	30
	Superaquecimento	Sim

Fonte: MINHA CASA SOLAR (2013c).

Tabela 46 - Especificações da lâmpada LED de 12,5 W usada no projeto de iluminação LED.

Tipo de lâmpada	Led
Marca	Philips
Modelo	EnduraLED A19 Bulb
Potência [W]	12,5
Fluxo Luminoso [lm]	800
Eficiência Luminosa [lm/W]	64
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	> 80
Tensão [V]	110 – 130
Vida Mediana [horas]	25.000

Fonte: Philips (2013).

Tabela 47 - Especificações da lâmpada LED de 9 W usada no projeto de iluminação LED.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Led</b>
Marca	Philips
Modelo	MASTER LED bulb 9-60W E27 6500K 100-240V A60
Potência [W]	9
Fluxo Luminoso [lm]	600
Eficiência Luminosa [lm/W]	66,67
Temperatura de Cor [K]	6500
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	75
Tensão [V]	100 – 240
Vida Mediana [horas]	45.000

**Fonte: Philips (2013).**

Tabela 48 - Especificações da lâmpada LED de 22 W usada no projeto de iluminação LED.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Led</b>
Marca	Philips
Modelo	MASTER LEDtube GA300 1200mm 22W 840 C
Potência [W]	22
Fluxo Luminoso [lm]	2100
Eficiência Luminosa [lm/W]	95,45
Temperatura de Cor [K]	4000
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	85
Tensão [V]	100 – 240
Vida Mediana [horas]	50.000

**Fonte: Philips (2013).**

Tabela 49 - Especificações da lâmpada fluorescente de 42 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLWTWIST42W127B
Potência [W]	42
Fluxo Luminoso [lm]	2800
Eficiência Luminosa [lm/W]	66
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	82
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 50 - Especificações da lâmpada fluorescente de 14 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLEW14W127GENB
Potência [W]	14
Fluxo Luminoso [lm]	810
Eficiência Luminosa [lm/W]	57
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	82
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	6.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 51 - Especificações da lâmpada fluorescente de 18 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLED18W127GENB
Potência [W]	18
Fluxo Luminoso [lm]	1100
Eficiência Luminosa [lm/W]	61
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	82
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 52 - Especificações da lâmpada fluorescente de 32 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	TLDRS32W-S84-ECO
Potência [W]	32
Fluxo Luminoso [lm]	2700
Eficiência Luminosa [lm/W]	84
Temperatura de Cor [K]	4000
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	84
Tensão [V]	-
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 53 - Especificações da lâmpada fluorescente de 11 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLEW11W127GENB
Potência [W]	11
Fluxo Luminoso [lm]	600
Eficiência Luminosa [lm/W]	59
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	82
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 54 - Especificações da lâmpada fluorescente de 27 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLWTWIST27W127B
Potência [W]	27
Fluxo Luminoso [lm]	1750
Eficiência Luminosa [lm/W]	66
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	82
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 55 - Especificações da lâmpada fluorescente de 20 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLDTWIST20W127B
Potência [W]	20
Fluxo Luminoso [lm]	1250
Eficiência Luminosa [lm/W]	62
Temperatura de Cor [K]	6500
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	80
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 56 - Especificações da lâmpada fluorescente de 23 W usada no projeto de iluminação fluorescente.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	PLWTWIST23W127B
Potência [W]	23
Fluxo Luminoso [lm]	1550
Eficiência Luminosa [lm/W]	65
Temperatura de Cor [K]	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	82
Tensão [V]	110 – 127
Vida Mediana [horas]	8.000

**Fonte: Philips (2009).**

Tabela 57 - Especificações do reator usado no projeto luminotécnico fluorescente para as lâmpadas de 32 W.

<b>Tipo de lâmpada</b>	<b>Fluorescente</b>
Marca	Philips
Modelo	EL232A16
Partida	Instantânea
Lâmpadas	2 x 32W
Tensão[V]	127
Frequência[Hz]	50/60
Corrente da Rede [A]	0,54
Potência Total[W]	67
Fator de Potência	0,98
Fator de Fluxo Luminoso	1,00
Distorção Harmônica	10%

**Fonte: Philips (2009).**

## ANEXO G – Especificações das baterias

Tabela 58 - Especificações da bateria usada para o sistema fotovoltaico de iluminação LED

<b>Especificação da bateria – Sistema fotovoltaico de iluminação LED</b>		
Marca		Freedom
Modelo		DF2500
Capacidade a 25 °C [Ah]	10 h	130
	20 h	150
	100 h	115
Dimensões [mm]	Comprimento	511
	Largura	213
	Altura	230
Peso [kg]		44,6
Tensão de flutuação a 25 °C [V]		13,2 a 13,8
Tensão de equalização e carga a 25 °C [V]		14,4 a 15,5
Tensão final de descarga [V]		10,5
Compensação de temperatura [V]	1 °C acima de 25 °C	-0,033
	1 °C abaixo de 25 °C	+0,033

**Fonte: Adaptado de Freedom (2013).**

Tabela 59 - Especificações da bateria usada para o sistema fotovoltaico de iluminação fluorescente

<b>Especificação da bateria – Sistema fotovoltaico de iluminação fluorescente</b>		
Marca		Freedom
Modelo		DF3000
Capacidade a 25 °C [Ah]	10 h	156
	20 h	170
	100 h	185
Dimensões [mm]	Comprimento	511
	Largura	213
	Altura	230
Peso [kg]		48,3
Tensão de flutuação a 25 °C [V]		13,2 a 13,8
Tensão de equalização e carga a 25 °C [V]		14,4 a 15,5
Tensão final de descarga [V]		10,5
Compensação de temperatura [V]	1 °C acima de 25 °C	-0,033
	1 °C abaixo de 25 °C	+0,033

**Fonte: Adaptado de Freedom (2013).**

Tabela 60 - Especificações da bateria usada para os protótipos ensaiados

Especificação da bateria – Protótipos de sistema de iluminação fluorescente e LED		
Marca	Freedom	
Modelo	DF2000	
Capacidade a 25 °C [Ah]	10 h	94
	20 h	105
	100 h	115
Dimensões [mm]	Comprimento	330
	Largura	172
	Altura	240
Peso [kg]	27,1	
Tensão de flutuação a 25 °C [V]	13,2 a 13,8	
Tensão de equalização e carga a 25 °C [V]	14,4 a 15,5	
Tensão final de descarga [V]	10,5	
Compensação de temperatura [V]	1 °C acima de 25 °C	-0,033
	1 °C abaixo de 25 °C	+0,033

Fonte: Adaptado de Freedom (2013).

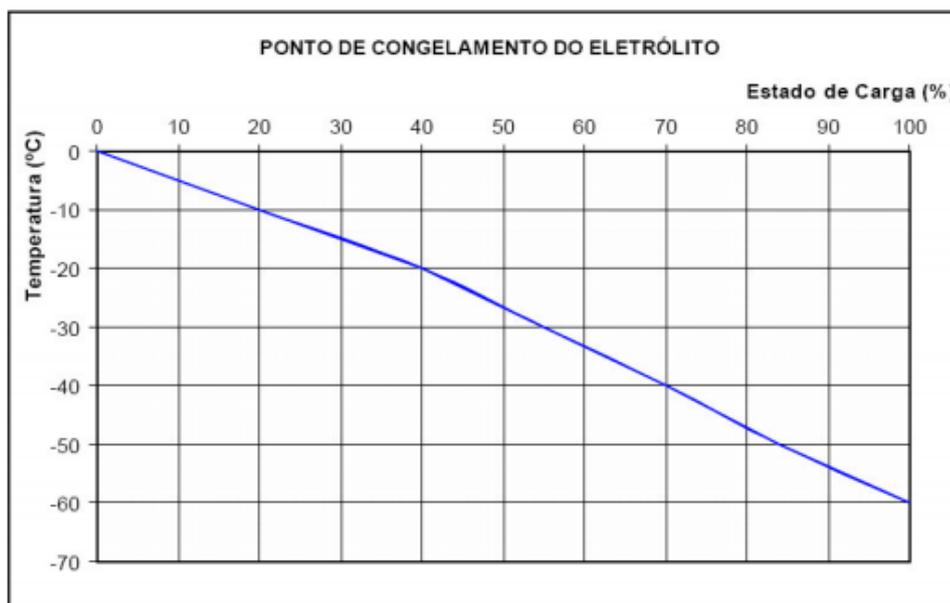


Figura 100- Ponto de congelamento do eletrólito da bateria.

Fonte: Adaptado de Freedom (2013).

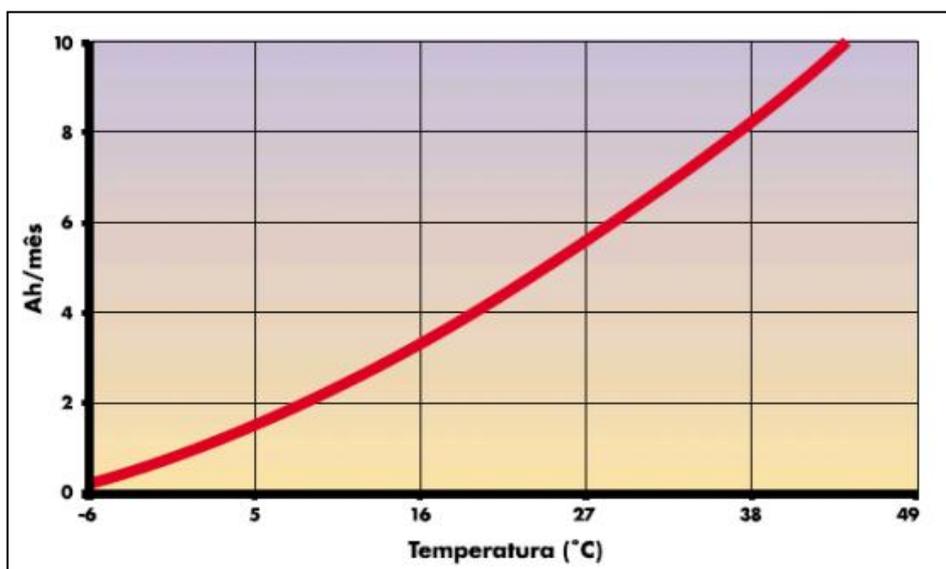


Figura 101 - Taxa de auto-descarga.  
Fonte: Adaptado de Freedom (2013).

## ANEXO H – Equipamentos usados nos protótipos dos sistemas fotovoltaicos fluorescente e LED

### PAINEL FOTOVOLTAICO DO PROTÓTIPO

Tabela 61 - Especificações do painel fotovoltaico utilizado no protótipo.

Especificação do painel fotovoltaico – protótipo	
Marca	Heliodinâmica
Modelo	HM - 45D12
Constituição	36 células solares de silíciomonocristalino de 100 mm, redondas
Potência máxima [W] *	45,00
Corrente em potência máxima [A] *	2,64
Tensão em potência máxima [V] *	17,00
Corrente de curto-circuito [A] *	2,90
Tensão de circuito aberto [V] *	21,00
Capacidade média de geração [Ah/dia] **	14,60
Dimensões (C x L x A) [mm]	1007 x 402 x 45
Peso [kgm]	5,20
Condições de operação	
Temperatura	-55 °C - 60 °C
Umidade relativa	até 100 %
Altitude	até 7000 m
Ventos	até 200 km/h

**Fonte: Heliodinâmica (2012).**

**Nota:**

- (1) especificações médias, sob radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup> AM1.5 e temperatura de 25 °C, sujeitas a variações de 10 %.
- (2) sob insolação média anual de 5.580 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

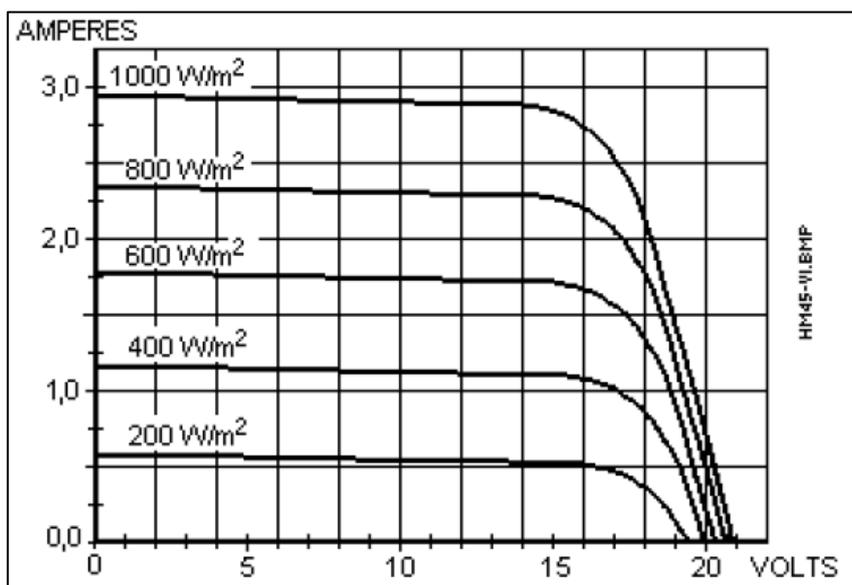


Figura 102 - Curva característica I x V do Módulo Fotovoltaico HM-45D12 à 45 °C.

Fonte: Heliodinâmica (2012).

## LÂMPADAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS

Tabela 62 - Especificações das lâmpadas utilizadas nos protótipos.

Tipo de lâmpada	Fluorescente	Led
Marca	Taschibra	Philips
Modelo	TKT 15-2-2K7	EnduraLED A19 Bulb
Potência [W]	15	12,5
Fluxo Luminoso [lm]	819	800
Eficiência Luminosa [lm/W]	54	64
Temperatura de Cor [K]	2700	2700
Índice de Reprodução de Cor (Ra/IRC)	> 80	> 80
Tensão [V]	220 - 240	110 – 130
Corrente [A]	0,12	0,16
Fator de Potência	≥ 0,5	0,7
Vida Mediana [horas]	6.000	25.000
Base	E-27	E-26

Fonte: Philips e Taschibra (2013).

## CONTROLADOR DE CARGA DO PROTÓTIPO

Tabela 63 - Especificações do controlador de carga utilizado.

Especificação do controlador de carga – protótipo		
Tensão nominal [V]	12/24 detecção automática	
Seleção da bateria [V]	Bateria Chumbo-ácido	Bateria Gel
Máxima corrente de carga da bateria [A]	10	15
Máxima corrente da carga [A]	10	15
Tensão de equalização [V]	14,5/29 (25 °C)	14,3/28,6(25 °C)
Tensão de carga [V]	14,8 V/29,6 V (25 °C)	14,4/28,8 (25 °C)
Tensão de flutuação [V]	13,7/27,4 (25 °C)	13,6/27,2 (25 °C)
Tensão mínima de desconexão (LVD)	11 V controlado pela tensão	
Tensão de reconexão da carga a 25 °C [V]	12,8/25,6 (25 °C)	
Proteção de conexão reversa para saída DC	Fusível de 10 A	
Consumo de corrente [mA]	< 4	
Compensação de temperatura	- 4 mA/ célula x K	
Temperatura de operação [°C]	-40 ~ 50	
Grau de proteção	IP 22	
Bitola máxima dos cabos	16 mm <sup>2</sup> (AWG 6)	
Dimensões [mm]	86 x 68 x 36	
Peso [kg]	0,145	

Fonte: Manual do usuário (2013).

## INVERSOR DO PROTÓTIPO

Tabela 64 - Especificações do inversor utilizado no protótipo.

Especificação do inversor – protótipo		
Modelo	SCD12/24 – 15	
Potência nominal [W]	150	
Saída	Potência de pico [W]	300
	Frequência [Hz]	$60 \pm 5 \%$
	Regulagem de AC [%]	$\pm 10$
	Tensão AC [V]	110 – 120
	Onda de tensão	Onda sinusoidal modificada
Consumo de corrente [A]		$< 0,35$
Entrada	Tensão DC [V]	12
	Gama de tensões [V]	10 – 15
	Eficiência [%]	$\geq 80$
Proteção	Desligamento de bateria [V]	$9,5 \pm 0,5 \text{ V}$
	Sobrecarga [W]	$> 180$
	Sobretensão [V]	15 – 16
	Superaquecimento [°C]	$> 60$
	Saída em curto	Desligamento Automático
	Polaridade da bateria	Por fusível aberto

Fonte: *Power inverter* (2013).

## LUXÍMETRO UTILIZADO

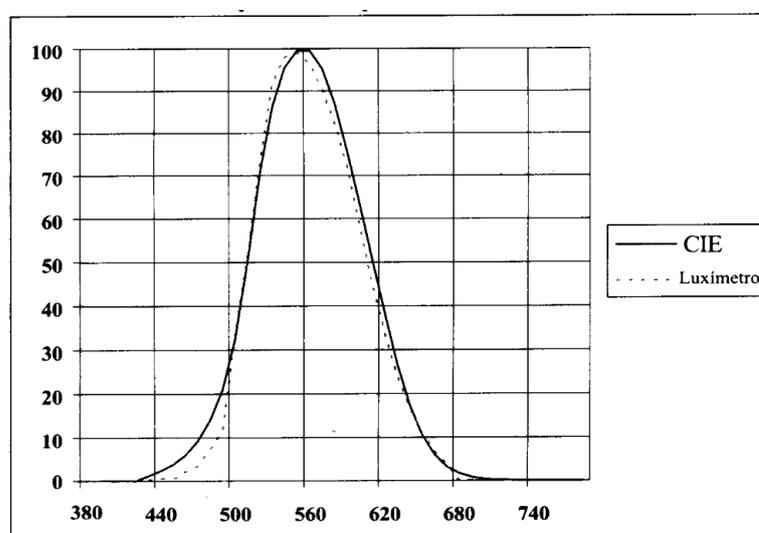


Figura 103 - Curva de resposta espectral do luxímetro utilizado.

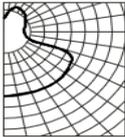
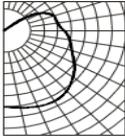
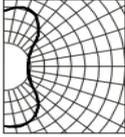
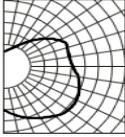
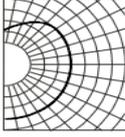
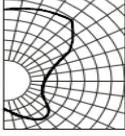
Fonte: Adaptado de Icel Manaus (2013).

Tabela 65 - Especificações do luxímetro utilizado.

<b>Gerais</b>		
Marca	ICEL Manaus	
Modelo	LD-511	
Display	Cristal líquido (LCD), 3 ½ dígitos (1999)	
Funções	Intensidade luminosa em Lux com correção de cosseno	
Seleção de escala	Manual	
Memória	"Data Hold"	
Taxa de teste	0,2 vezes por segundo	
Temperatura de operação	-10 - 40 °C	
Umidade de operação	< 70 % sem condensação	
Altitude de operação	< 2000 m	
Ambiente de operação	Interno; grau 2 de poluição	
Alimentação	Bateria 9 V	
Corrente de consumo	Aproximadamente 2 mA	
Comprimento do fio da célula	~ 150 cm	
Fotocélula	Fotodiodo de silício e filtro	
Dimensões e peso	130 x 72 x 30 mm/ 106 x 57 x 26 mm (sensor); 170g	
<b>Técnicas</b>		
Escala [Lux]	Resolução [Lux]	Exatidão
2000	1	±(4 % + 2d)
20000	10	±(4 % + 2d)
100000	100	±(5 % + 2d)

**Fonte: Icel Manaus (2013).**

ANEXO I – Tabela de eficiência do recinto ( $\eta_R$ )

Luminária	Refletâncias													
	Teto	0,8			0,5			0,8			0,5			0,3
	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_1$	
	Parede	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3		
	Piso	0,3						0,1						
	Índice do Recinto	K												
B 3		0,6	0,53	0,27	0,22	0,27	0,21	0,51	0,27	0,22	0,26	0,21	0,20	
		0,8	0,66	0,39	0,32	0,36	0,30	0,62	0,38	0,31	0,35	0,29	0,28	
		1	0,75	0,47	0,39	0,43	0,36	0,69	0,46	0,38	0,42	0,30	0,34	
		1,25	0,82	0,55	0,46	0,50	0,43	0,75	0,53	0,45	0,48	0,42	0,40	
		1,5	0,88	0,61	0,52	0,55	0,49	0,80	0,59	0,51	0,54	0,47	0,45	
		2	0,96	0,72	0,63	0,64	0,58	0,86	0,67	0,60	0,61	0,56	0,52	
		2,5	1,02	0,80	0,71	0,70	0,64	0,90	0,73	0,67	0,66	0,61	0,57	
		3	1,05	0,85	0,76	0,74	0,68	0,92	0,77	0,71	0,69	0,65	0,60	
		4	1,09	0,92	0,84	0,79	0,74	0,94	0,83	0,77	0,74	0,70	0,65	
		5	1,12	0,97	0,89	0,83	0,78	0,96	0,86	0,81	0,76	0,73	0,68	
B 4		0,6	0,51	0,25	0,18	0,24	0,18	0,48	0,25	0,19	0,23	0,18	0,17	
		0,8	0,62	0,34	0,26	0,32	0,25	0,58	0,33	0,26	0,31	0,25	0,24	
		1	0,71	0,41	0,32	0,38	0,31	0,64	0,40	0,32	0,37	0,30	0,29	
		1,25	0,78	0,48	0,39	0,44	0,37	0,71	0,47	0,39	0,43	0,35	0,34	
		1,5	0,83	0,54	0,45	0,49	0,41	0,75	0,53	0,44	0,47	0,40	0,38	
		2	0,91	0,64	0,54	0,57	0,49	0,81	0,60	0,52	0,55	0,47	0,45	
		2,5	0,96	0,72	0,61	0,63	0,55	0,85	0,66	0,59	0,59	0,53	0,49	
		3	0,99	0,77	0,67	0,67	0,59	0,88	0,70	0,63	0,63	0,57	0,52	
		4	1,04	0,85	0,75	0,72	0,66	0,91	0,77	0,69	0,67	0,62	0,57	
		5	1,07	0,90	0,81	0,76	0,70	0,92	0,80	0,73	0,70	0,66	0,60	
C 2		0,6	0,51	0,27	0,21	0,23	0,18	0,48	0,27	0,20	0,23	0,19	0,18	
		0,8	0,62	0,36	0,29	0,32	0,26	0,58	0,34	0,28	0,31	0,26	0,24	
		1	0,70	0,44	0,35	0,38	0,32	0,64	0,41	0,34	0,37	0,31	0,28	
		1,25	0,77	0,50	0,41	0,43	0,37	0,70	0,48	0,41	0,42	0,36	0,33	
		1,5	0,83	0,56	0,47	0,47	0,41	0,75	0,54	0,46	0,46	0,40	0,36	
		2	0,91	0,66	0,57	0,55	0,48	0,80	0,62	0,55	0,53	0,46	0,41	
		2,5	0,96	0,74	0,64	0,60	0,54	0,84	0,66	0,61	0,57	0,51	0,46	
		3	0,99	0,79	0,69	0,63	0,58	0,87	0,72	0,66	0,60	0,55	0,48	
		4	1,04	0,87	0,78	0,69	0,64	0,90	0,78	0,72	0,64	0,60	0,53	
		5	1,07	0,92	0,84	0,72	0,67	0,91	0,80	0,76	0,67	0,63	0,55	
C 3		0,6	0,47	0,21	0,14	0,20	0,13	0,46	0,20	0,15	0,19	0,14	0,13	
		0,8	0,58	0,30	0,22	0,27	0,21	0,55	0,29	0,22	0,26	0,20	0,19	
		1	0,66	0,37	0,28	0,32	0,26	0,61	0,36	0,27	0,32	0,24	0,23	
		1,25	0,73	0,43	0,33	0,38	0,30	0,67	0,42	0,33	0,36	0,29	0,27	
		1,5	0,78	0,49	0,39	0,43	0,35	0,71	0,47	0,38	0,41	0,33	0,31	
		2	0,87	0,60	0,49	0,51	0,43	0,77	0,56	0,47	0,49	0,41	0,37	
		2,5	0,92	0,68	0,57	0,56	0,49	0,81	0,61	0,54	0,54	0,46	0,42	
		3	0,96	0,74	0,63	0,60	0,53	0,85	0,66	0,59	0,57	0,50	0,46	
		4	1,01	0,82	0,72	0,66	0,60	0,88	0,72	0,66	0,62	0,56	0,51	
		5	1,05	0,87	0,78	0,70	0,64	0,90	0,77	0,70	0,65	0,60	0,54	
C 4		0,6	0,47	0,21	0,14	0,19	0,14	0,45	0,20	0,16	0,19	0,14	0,14	
		0,8	0,57	0,30	0,21	0,26	0,20	0,55	0,29	0,22	0,25	0,19	0,18	
		1	0,65	0,36	0,27	0,31	0,24	0,61	0,35	0,27	0,30	0,23	0,21	
		1,25	0,72	0,42	0,32	0,36	0,29	0,67	0,41	0,32	0,35	0,28	0,25	
		1,5	0,77	0,48	0,37	0,40	0,33	0,71	0,46	0,36	0,39	0,32	0,28	
		2	0,85	0,58	0,46	0,47	0,39	0,77	0,54	0,45	0,46	0,38	0,33	
		2,5	0,90	0,65	0,54	0,53	0,45	0,81	0,60	0,51	0,50	0,43	0,38	
		3	0,94	0,71	0,60	0,57	0,50	0,84	0,65	0,56	0,53	0,47	0,41	
		4	0,99	0,79	0,70	0,63	0,56	0,87	0,71	0,64	0,58	0,53	0,46	
		5	1,02	0,84	0,75	0,66	0,60	0,90	0,75	0,68	0,62	0,56	0,49	
D 2		0,6	0,47	0,20	0,14	0,17	0,12	0,42	0,20	0,15	0,17	0,12	0,11	
		0,8	0,55	0,28	0,21	0,24	0,18	0,52	0,27	0,21	0,24	0,18	0,16	
		1	0,63	0,36	0,27	0,29	0,23	0,59	0,34	0,27	0,29	0,22	0,20	
		1,25	0,70	0,43	0,33	0,34	0,28	0,65	0,41	0,33	0,33	0,27	0,24	
		1,5	0,76	0,49	0,39	0,39	0,32	0,69	0,47	0,39	0,37	0,31	0,27	
		2	0,84	0,59	0,49	0,46	0,39	0,74	0,55	0,48	0,44	0,37	0,31	
		2,5	0,90	0,67	0,57	0,51	0,44	0,78	0,61	0,54	0,48	0,42	0,35	
		3	0,93	0,72	0,63	0,55	0,49	0,82	0,65	0,59	0,51	0,46	0,39	
		4	0,99	0,81	0,72	0,60	0,54	0,85	0,72	0,66	0,55	0,51	0,43	
		5	1,02	0,86	0,78	0,63	0,58	0,87	0,76	0,70	0,58	0,54	0,45	

Fonte: Adaptado de OSRAM DO BRASIL (2012).

ANEXO J – Tabela de eficiência aproximada das luminárias ( $\eta_L$ )

<b>Tipo de Luminária</b>	<b><math>\eta_L</math></b>
Luminárias abertas com lâmpadas nuas	0,9
Luminárias com refletor ou embutidas abertas	0,7
Luminárias com refletor e lamelas de alta eficiência	0,7
Luminárias com refletor ou embutidas com lamelas	0,6
Luminárias tipo " <i>plafond</i> " com acrílico anti-ofuscante	0,6
Luminárias de embutir com acrílico anti-ofuscante	0,5

**Fonte: OSRAM DO BRASIL (2012).**