



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS ILHA SOLTEIRA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIÁN ALBERTO RAMÍREZ LÓPEZ

**SISTEMAS AUTÔNOMOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM
CORRENTE CONTÍNUA**

Ilha Solteira

2014

JULIÁN ALBERTO RAMÍREZ LÓPEZ

**SISTEMAS AUTÔNOMOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM
CORRENTE CONTÍNUA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Especialidade: Automação.

Orientador: Prof. Dr. Dionizio Paschoareli Júnior

Ilha Solteira

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R173s Ramirez Lopez, Julian Alberto.
Sistemas autônomos de iluminação pública em corrente contínua / Julian Alberto Ramirez Lopez. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
91 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Dionizio Paschoarelli Júnior
Inclui bibliografia

1. Geração distribuída. 2. Iluminação pública. 3. Corrente contínua. 4. Microredes de energia. 5. Sistema autônomo. 6. Fontes alternativas de energia.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Sistemas Autônomos de Iluminação Pública em Corrente Contínua

AUTOR: JULIÁN ALBERTO RAMÍREZ LÓPEZ

ORIENTADOR: Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JÚLIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCELO GRADELLA VILLALVA
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 23 de maio de 2014.

A minha família, amigos e professores que acreditaram e estiveram nesta caminhada.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Quero dedicar e agradecer neste espaço as pessoas ou instituições que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada. A todos eles deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Primeiro quero agradecer a Deus, pelo que conquistei até agora, e dar valor a esta experiência, mas peço a Ele para me dar sabedoria para conquistar muito mais.

Agradeço a meus pais, Bernardo e Doralba, a meus irmãos, Dora, Jhon Faber, Leonardo e Johana, por fazer tudo mais fácil e pelo apoio incondicional em cada momento de minha vida.

Ao meu orientador Dionizio, por acreditar em mim e responder a tantas perguntas e dúvidas. A meus companheiros de laboratório Jair e Minéia, pelo carinho e acolhimento. A Elis, Elizete e José Antônio, Regina e Rodrigo, Cris, Joyce e ao senhor Júnior, que se tornaram minha família no Brasil.

Também quero manifestar minha gratidão a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira.

Sábio é o homem que conhece alguma coisa sobre tudo; e tudo sobre alguma coisa.

O mais sábio é aquele que estuda como se fosse viver eternamente, e vive como se fosse morrer amanhã.

Anônimo

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo principal apresentar uma alternativa aos circuitos de iluminação pública convencionais, através de Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI), alimentados em corrente contínua, por meio de painéis fotovoltaicos. O circuito proposto é radial e conformado por vinte nós, que compõem um circuito de iluminação de um loteamento urbano composto de 293 nós no total. Para a alocação da geração distribuída (GD), foi solucionado um problema de Programação Quadrático Inteiro Misto (PQIM), através da linguagem de modelagem algébrica AMPL (*Modeling Language for Mathematical Programming*), utilizando o solver CPLEX, que faz uso do algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B). É feita uma análise comparativa considerando aspectos técnicos, construtivos, ambientais e econômicos, considerando o investimento inicial para o circuito proposto para a conexão com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (VSAP) de 70 W e 220 Vca, normalmente usadas em iluminação pública, e a tecnologia LED (*Light – Emitting Diode*) de 30 W de alto brilho de 12 e 24 Vcc. É estimado um tempo de retorno (*payback*) para um horizonte de vinte cinco anos (vida útil dos painéis solares fotovoltaicos), para determinar o ganho e economia obtida com a troca de lâmpada VSAP por LED no circuito proposto.

Palavras-chave: Corrente contínua. Iluminação pública. Microssistemas. Sistemas isolados. Tecnologia LED.

ABSTRACT

This research presents an alternative to conventional street lighting circuits through a Microsystem Isolated Generation and Distribution of Electric Power (MIGDI) fed by direct current through photovoltaic panels. The proposed radial circuit is formed of 20 points of lighting, which comprises a subdivision of an urban lighting circuit composed of 293 nodes in total. For the allocation of distributed generation (DG), a Mixed Integer Quadratic Programming (MQIP) was solved using algebraic modeling language AMPL (Modeling Language for Mathematical Programming) in the CPLEX solver, which uses optimization algorithm classical Branch and Bound (B & B). A comparative analysis, considering technical, constructive, environmental and economic aspects is made, from an initial investment, comparing vapor lamps high pressure sodium (HPS) of 70 W, 220 Vac, normally used in public lighting, and LED (Light - Emitting Diode) technology 30W high brightness, 12 and 24 Vdc . Time of return (payback) for a horizon of twenty five years (lifetime of photovoltaic solar panels) is estimated to determine the savings from the replacement of HPS lamp by LED technology in the proposed circuit.

Keywords: Direct current. Public lighting. Dc Microsystems. Isolated systems. LED technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama elétrico de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.....	21
Figura 2 - Reator eletromagnético usado em lâmpadas de descarga para iluminação pública	22
Figura 3– Circuito de comando automático ativado por baixa luminosidade no ambiente	23
Figura 4 – Vista lateral braço padrão COPEL tipo BR-1 para lâmpada de 70 W VSAP.....	24
Figura 5 - Modelos de luminárias VSAP e LED usadas em iluminação pública.....	25
Figura 6 – Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão tubular.....	26
Figura 7 - Circuito caso com a distância entre os postes e numeração de cada nó	28
Figura 8 - Fluxo de corrente no circuito caso.....	31
Figura 9 – Conexão do sistema autônomo isolado de iluminação pública em corrente contínua	38
Figura 10- Operação do sistema autônomo isolado de iluminação pública durante o dia	39
Figura 11 - Operação durante a noite	39
Figura 12 – Componentes e princípio de funcionamento de uma célula fotocélula.....	40
Figura 13 - Características elétricas dos painéis fotovoltaicos com condição padrão de teste	42
Figura 14 – Grandeza vida útil da bateria para diferentes percentagens de profundidade de descarga	43
Figura 15 - Funcionamento do controlador de carga.....	44
Figura 16 - Princípio de funcionamento do diodo LED	45
Figura 17 - Lâmpada de LEDs de alta luminância ou alta potência de luz branca e 5 módulos substituíveis de LEDs	46
Figura 18 – Divisão ou ramificação Branch and Baund (B&B)	49
Figura 19 - Diagrama unifilar do circuito em corrente contínua para tensão de 12 Vcc.....	52
Figura 20 – Conexão em paralelo das baterias FREEDOM DF 3000 de 12 Vcc	61
Figura 21 - Diagrama unifilar circuito caso de 24 Vcc	68
Figura 22- Conexão série do banco de baterias para garantir a tensão de 24 Vcc	72
Figura 23 - Relação investimento inicial e vida útil em anos.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade de lâmpadas instaladas no Brasil para iluminação pública.....	17
Tabela 2 - Custos o investimento inicial do circuito caso para os 20 nós em corrente alternada	35
Tabela 3 – Custo de vida útil do circuito em corrente alternada	36
Tabela 4 – Tensão nos nós de alocação e potência a ser gerada	50
Tabela 5 - Potência mínima a ser gerada por cada nó de alocação	51
Tabela 6 - Correntes injetadas por nó de geração para 12 Vcc	53
Tabela 7 - Radiação média mensal [kWh/m ²] de Três Lagoas (MS)	53
Tabela 8 - Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² . dia] de Três Lagoas (MS).....	54
Tabela 9 – Energia diária consumida pelo sistema autônomo de iluminação a 12 Vcc.....	56
Tabela 10 - Potência mínima do gerador fotovoltaico baixo condições padrão STC	56
Tabela 11 - Potências mínimas corrigidas baixo condições padrão STC considerando as perdas de fiação e das baterias.....	57
Tabela 12 - Potência mínima para cada nó de geração para uma autonomia de dois dias	58
Tabela 13 - Corrente diária e corrente diária corrigida para cada nó de geração em Ampere .	59
Tabela 14 – Corrente no banco de baterias para uma autonomia de dois dias	60
Tabela 15 - Perdas no circuito caso para 12 Vcc obtidas através do algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B).....	62
Tabela 16 - Custo circuito caso com tensão de 12 Vcc	63
Tabela 17 - Custo histórico para um horizonte de 25 anos do sistema com tensão de 12 Vcc	64
Tabela 18 – Tensão nos nós de alocação e potência a ser gerada	67
Tabela 19 - Energia diária consumida pelo sistema autônomo de iluminação a 24 Vcc	69
Tabela 20 - Potência mínima do gerador fotovoltaico baixo condições padrão STC	69
Tabela 21 - Potências mínimas corrigidas baixo condições padrão STC considerando as perdas de fiação e das baterias.....	70
Tabela 22 - Potência mínima para cada nó de geração para uma autonomia de dois dias	70
Tabela 23 - Corrente do sistema para 24 Vcc.....	71
Tabela 24 - Corrente diária e corrente diária corrigida para 24 Vcc	71
Tabela 25 - Banco de baterias para uma autonomia de 2 dias.....	72
Tabela 26 - Perdas circuito em 24 Vcc.....	73
Tabela 27 - Custo do investimento inicial do sistema fotovoltaico para 24 Vcc	74
Tabela 28 - Custo do sistema para um horizonte de 25 anos	74

Tabela 29 - Consumo de energia das duas tecnologias	76
Tabela 30 - Custo de consumo mensal e anual das conexões apresentadas	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPL	<i>Modelling Language for Mathematical Programming</i>
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
FF	Fator de Forma
GD	Geração Distribuída
GEE	Emissões de Gás Efeito Estufa
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
IP	Iluminação Pública
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo emissor de luz)
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PQIM	Programação Quadrático Inteiro Misto
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulsos)
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica
TUSD	Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Transmissão
VSAP	Lâmpada de Vapor de Sódio a Alta Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

C_g	Carga instalada
C_{gt}	Carga instalada total
C_{H25}	Custo histórico do sistema para sua vida útil
C_m	Consumo mensal
C_M	Custo de manutenção do sistema durante seu horizonte de vida útil.
CO_2e	Equivalente de Dióxido de Carbono
D_{A25}	Depreciação acumulativa para um horizonte de 25 anos
F_m	Fator de manutenção
F_u	Fator de utilização
G_{ij}	Matriz das condutâncias
$GtCO_2e$	Giga Toneladas Equivalente de Dióxido de Carbono
I_{Bat}	Corrente do banco de baterias
I_{con}	Corrente no controlador
$I_{diária}$	Corrente diária
$I_{diáriacorr}$	Corrente diária corrigida
I_{g_i}	Corrente gerada pelo gerador solar em Amperes
I_l	Corrente que flui pelo condutor em Ampères.
$I_{máx}$	Corrente máxima permitida pelos condutores em Amperes
$I_{máx}$	Corrente máxima na bateria
I_{Ramo}	Corrente de ramo
I_{sc}	Corrente de curto – circuito
IPT	Máxima corrente fornecida pelo painel solar e
N	Número de dias do mês = 30
n_i	Variável binária de alocação do gerador solar no nó i
N_{min}	Número permitido de painéis solares a serem instalados no sistema
N_{ICA}	Número de lâmpadas
P_{Aut2}	Potência de Autonomia para dois dias
P_{ICA}	Potência das luminárias de VSAP
P_m	Potência mínima a ser alocada
P_{mCA}	Potência de cada módulo de iluminação em corrente alternada
P_{MC}	Potência Mínima Corrigida

P_{mcp}	Potência Mínima Corrigida baixo condições padrão STC
P_S	Preço do sistema
P_T	Perdas totais
R_C	Resistencia do condutor em Ω/m
R\$/MWh	Custo Megawatt hora em Reais
T_{on}	Tempo que fica acesa a lâmpada em horas
V_i	Tensão no nó i
V_j	Tensão no nó j
V_{max}	Tensão de máxima potência
V_N	Tensão nominal
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
V_R	Valor esperado residual do sistema depois de sua vida útil
V_U	Vida útil de 25 anos
W_{Ramo}	Potência de ramo
Ω_b	Conjunto de nós
Ω_l	Conjunto de linhas
Ω/m	Ohms por metro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL	17
2.1 NORMA TÉCNICA VIGENTE	18
2.2 MÓDULO ILUMINAÇÃO PÚBLICA (MPI).....	19
2.2.1 Lâmpadas	19
2.2.2 Reatores	22
2.2.3 Circuito de Comando automático	22
2.2.4 Braços para iluminação pública.....	23
2.2.5 Luminárias	24
2.2.6 Lâmpadas	25
2.3 CONCLUSÃO	26
3 ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM LOTEAMENTO RESIDENCIAL.....	27
3.1 APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO CASO EM CORRENTE ALTERNADA	27
3.1.1 Descrição da rede caso	27
3.1.2 Descrição elétrica e construtiva do projeto	28
3.2 CÁLCULO DO PROJETO EM IP CONVENCIONAL	29
3.3 CONCLUSÃO	36
4 PROPOSTA DO TRABALHO: ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM CORRENTE CONTÍNUA EM LOTEAMENTOS URBANOS.....	38
4.1 COMPONENTES E DEFINIÇÕES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	39
4.1.1 Painel solar fotovoltaico	40
4.1.2 Baterias	42
4.1.3 Controlador de carga	44
4.1.4 Luminárias y lâmpadas LED	44
4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	46
4.2.1 Descrição modelo matemático	47
4.2.2 Dimensionamento para 12 Vcc.....	49
<i>4.2.2.1 Custo do kWh para a conexão a 12 Vcc</i>	<i>63</i>
<i>4.2.3 Dimensionamento para 24 Vcc</i>	<i>66</i>
<i>4.2.3.1 Custo do kWh para a conexão a 24 Vcc</i>	<i>74</i>
4.3 COMPARATIVO ENTRE O CIRCUITO CASO EM CORRENTE ALTERNADA E CORRENTE CONTÍNUA EM 12VCC E 24 VCC	75

4.3.1 Consumo	76
4.3.2 Ambientais	78
4.4 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	82
ANEXO A - Dados técnicos do painel solar Kyocera para a conexão a 12 Vcc e 135 W	87
ANEXO B - Dados técnicos do painel solar Kyocera para a conexão a 24Vcc e 245W	89

1 INTRODUÇÃO

As primeiras lâmpadas de arco elétrico foram desenvolvidas pelo engenheiro eletricitista russo, Pavel Yablochkov¹ em 1876. Embora muitos inventores tenham tentado criar fontes de luz a partir da energia elétrica, foi o norte-americano Thomas Alva Edison² que desenvolveu um filamento de carbono que funcionava a 110 V tinha uma vida útil de 1200 horas. Em 1879 foi instalado em New York o primeiro sistema de iluminação, com 115 focos de luz.

Posteriormente, desenvolveu-se a lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão, que é uma lâmpada cuja descarga ocorre dentro de um gás de alta pressão, a qual foi chamada HID (*High Intensity Discharge*), também conhecida, em português, como DAP (Descarga em Alta Pressão). Após a lâmpada de vapor de mercúrio, foi desenvolvida a lâmpada de vapor de sódio de baixa pressão e, em seguida, a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão, que é a mais usada atualmente (GIANELLI et al., 2012).

Cerca de 19% da energia mundial é consumida na iluminação pública (PHILPHS, 2012). Por isso, é importante o desenvolvimento de projetos que otimizem o consumo de energia. No Brasil, um estudo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, realizado em 2008, indicou que a iluminação pública correspondia a aproximadamente 4,5% da demanda nacional e a 3,4% do consumo total de energia elétrica do país, o equivalente a uma demanda de 2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano (PROCEL/ELETRONBRAS, 2008).

Para o caso do Brasil, segundo o Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas para América Latina – IDEAL e, de acordo com os dados de dezembro de 2012 do Ministério de Minas e Energias, a capacidade solar instalada no país é de 8 MW, com um custo estimado de R\$ 280 a R\$300 por Megawatt-hora (MWh). Este custo poderia cair para

¹ Pavel Yablochkov: Científico Russo, criador da lâmpada Yablochkov, é um tipo de lâmpada de arco, usada em sistemas de iluminação pública.

² Thomas Alva Edison: Foi um inventor, cientista e empresário norte americano que desenvolveu muitos dispositivos importantes de grande interesse industrial. Entre as suas contribuições mais universais para o desenvolvimento tecnológico e científico encontra-se a lâmpada elétrica incandescente entre outros.

R\$ 165/MWh dentro de cinco anos, como consequência do grande potencial do país em energias renováveis.

Esta pesquisa apresenta uma alternativa de iluminação pública por meio de painéis fotovoltaicos e LEDs de alto brilho, que garantem um baixo consumo de energia, aproveitando os benefícios energéticos e ambientais desta tecnologia, além de explorar o uso da corrente contínua como alternativa de alimentação de circuitos elétricos.

No Capítulo 2 são apresentadas as normas técnicas Brasileiras que regulam e definem alguns conceitos básicos comumente usados num circuito de iluminação pública a partir da NBR 5101 de 2012, assim como as lâmpadas de descarga mais usadas no Brasil e de todos os componentes de um módulo de iluminação pública.

No Capítulo 3 é descrito um projeto de iluminação pública em corrente alternada. Um circuito hipotético é proposto a partir de um projeto de iluminação de um loteamento urbano. São calculadas a demanda e as perdas pelo efeito Joule e o custo do kWh do caso proposto, para alimentação em corrente alternada. É determinado o investimento inicial e o custo do sistema para um horizonte de 25 anos, tendo em conta a troca dos componentes do sistema neste tempo.

No Capítulo 4 é proposto um sistema de iluminação pública autônomo isolado, em corrente contínua, a partir de microgeração distribuída utilizando painéis fotovoltaicos. A partir do algoritmo de otimização clássica Branch & Braund (B&B), que aloca no sistema os geradores fotovoltaicos que fornecerão energia suficiente ao circuito em estudo durante a noite.

Os elementos que compoem o sistema são detalhados e, assim como no Capítulo 3, as perdas do sistema são calculadas para estimativa de tempo de retorno, com alimentação em 12 Vcc ou 24 Vcc. É feito comparativo entre a alimentação em corrente alternada e a alimentação a 24 Vcc, com estimativa de custos de investimeto inicial e taxa de retorno e custo do kWh

2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL

A iluminação pública é o serviço que tem por objetivo prover de luz, ou claridade artificial, os logradouros públicos no período noturno ou nos escurecimentos diurnos ocasionais, inclusive aqueles que necessitam de iluminação permanente no período diurno (ANEEL, 2000).

Com aproximadamente 15 milhões de pontos de iluminação no Brasil, o sistema apresenta uma demanda de 2,2 GW, que corresponde aproximadamente 4,5% da demanda nacional, e um consumo de 9,7 bilhões de *kWh/ano* (PROCEL/ELETROBRAS, 2008).

Destes 15 milhões de pontos de iluminação, as lâmpadas de vapor de sódio são majoritariamente utilizadas na iluminação pública brasileira, devido ao baixo consumo e longa vida útil. A Tabela 1 apresenta os pontos de iluminação pública instaladas no Brasil segundo cadastro da Procel/Eletrobras (2008).

Tabela 1- Quantidade de lâmpadas instaladas no Brasil para iluminação pública

Tipo de lâmpada	Quantidade	Porcentagem
Vapor de Sódio	9.294.611	62,93%
Vapor de Mercurio	4.703.013	31,84%
Mista	328427	2,22%
Incandescente	210.417	1,42%
Fluorescente	119.535	0,81%
Multi-Vapor Metálico	108.173	0,73%
Outras	5.134	0,03%
Total de unidades instaladas	14.769.310	100,00%

Fonte: (PROCEL/ELETROBRAS, 2008)

2.1 NORMA TÉCNICA VIGENTE

As normas técnicas estabelecem um modelo padrão a partir da experiência acumulada, para garantir segurança e qualidade. Algumas das normas mais comuns para iluminação pública no Brasil são:

- a) NBR 5101 de 2012:
Fixa requisitos, considerados como mínimos necessários, à iluminação de vias públicas, os quais são destinados a propiciar segurança aos tráfegos de pedestres e veículos;
- b) NBR 15129 de 07/2012
Requisitos particulares das luminárias para vias públicas e outro tipos de aplicações de iluminação externa;
- c) NBR 14744 de 09/2001:
Estabelece as condições exigíveis para postes de aço retos ou curvos e seus acessórios, destinados ao uso em iluminação;
- d) NBR IEC 60529 de 03/2005:
Aplicada para a classificação dos graus de proteção providos aos invólucros dos equipamentos elétricos (código IP), com tensão nominal não superior a 72,5 kV;
- e) NBR IEC 60662 de 04/1997
Especifica características das lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão.

Como referências internacionais existem as seguintes normas:

- a) CIE (Comissão internacional de iluminação) 115 de 1995
Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic;
- b) CIE 127 de 2007
Measurement of LEDs.

Existe ainda o IESNA Light Handbook de Illuminating Engineering Society of North America, que define critérios qualitativos e quantitativos para novos projetos de iluminação pública.

Para iluminação com LED encontra-se:

a) IEC/PAS 62722 de 13/10/2013

Especifica os requisitos de desempenho para as luminárias LED.

Além destas normas é muito importante ressaltar o decreto N° 414/2010, atualizada no ano 2012, anexo [1].

Obriga as prefeituras, estudar, planejar, projetar, programar e fiscalizar a ampliação e remodelação da rede de iluminação pública, inclusive no que diz respeito às especificações técnicas, compra, recebimento, armazenamento e controle de qualidade do material utilizado, bem como fixar orientação normativa sobre assuntos de sua competência, controlar as faturas do consumo de energia elétrica da rede de iluminação pública; manter cadastro atualizado e remover, suprimir e reinstalar equipamentos da rede, a partir do janeiro do ano 2014 (ANEEL, 2012, p. 41-42).

Este decreto estimula a implementação de novas tecnologias e projetos por parte das prefeituras, para que possam reduzir o consumo de energia para iluminação pública e operar a rede de iluminação pública com a qualidade e segurança adequadas.

2.2 MÓDULO ILUMINAÇÃO PÚBLICA (MPI)

Além das lâmpadas um MPI faz referência ao conjunto de equipamentos que formam um ponto de luz, incluindo suportes, luminárias, comando eletrônico e reatores. Todos os componentes do MIP participam para um melhor aproveitamento da energia na produção de energia luminosa em direção da via pública.

Os componentes de um módulo de iluminação pública são:

2.2.1 Lâmpadas

A lâmpada é um dispositivo elétrico que transforma energia elétrica em energia luminosa e/ou energia térmico (PHILIPS, 2012). A potência de uma lâmpada e o fluxo luminoso³ nominal da lâmpada e são dados que caracterizam o sistema de iluminação pública, no entanto, todos os outros componentes do sistema deverão atuar de forma integrada para que seja otimizada a utilização do fluxo luminoso produzido pela lâmpada. (SILVA, 2006)

³ Fluxo luminoso: É medido em Lumens (Lm), e consiste na radiação luminosa total, sensível ao olho humano emitido por uma fonte de luz em todas as direções.

Pode-se classificar as lâmpadas elétricas em duas categorias:

a) Lâmpadas Incandescentes

As lâmpadas incandescentes produzem energia luminosa a partir da incandescência de um filamento de tungstênio, que é o material que mais se adaptou às elevadas temperaturas que se verificam no interior das lâmpadas, onde existe vácuo ou um gás raro ou nobre (mercúrio, argônio) (LUZ, 2009);

b) Lâmpadas de Descarga

Nas lâmpadas de descarga o fluxo luminoso é gerado pela passagem da corrente elétrica através de um gás, mistura de gases ou vapores, quando em seus eletrodos se forma uma tensão elevada capaz de vencer a rigidez dielétrica do meio, (DA LUZ, 2010);

Nas lâmpadas usadas em iluminação pública, a luz é produzida pela radiação emitida pela descarga elétrica através de uma mistura gasosa composta de gases inertes e vapores metálicos que se encontra confinada num involucrio translúcido (tubo de descarga) em cujas extremidades encontram-se os eletrodos que formam a interface entre a descarga. (SGALBIERI, 2013).

Um tipo de lâmpadas de descarga são as VSAP, comumente usadas em iluminação pública, e é definida a continuação:

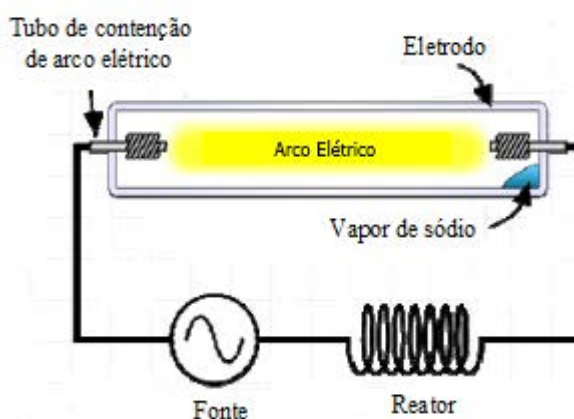
2.2.1.1 Lâmpada a Vapor de Sódio

A lâmpada de sódio oferece luz amarela e monocromática que distorce as cores, seu Índice de Reprodução de Cor (IRC)⁴ é de no máximo 30. Em contrapartida, oferece grande fluxo luminoso com baixo consumo. Seu funcionamento é parecido com o das fluorescentes, exceto pela presença do sódio no lugar do mercúrio. A partida requer reator específico e ignitor (espécie de starter que eleva a tensão na hora da partida para 4500 volts).

⁴ Índice de Reprodução de Cor (IRC)⁴: É a medida de correspondência entre a cor real de um objeto e sua aparência diante de uma fonte de luz. Corresponde a um número abstrato, variando de 0 a 100, que indica aproximadamente como a iluminação artificial permite ao olho humano perceber as cores com maior ou menor fidelidade, sendo melhor quanto maior este número

Utiliza o princípio da descarga através do vapor de sódio. A ionização do gás desta lâmpada tem que ser feita com uma tensão relativamente elevada (superior à da rede), motivo pelo qual se utiliza para o seu arranque um transformador. A Figura 1 apresenta o diagrama elétrico de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.

Figura 1 - Diagrama elétrico de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão



Fonte: (UFPR, 2010)

A vida útil das lâmpadas de vapor de sódio está próxima às 9.000 horas, possui um arranque lento, demorando entre 7 a 15 minutos a atingir o funcionamento normal. Quanto às luminárias em alta pressão, possuem uma elevada eficiência luminosa até 140 lm/W, longa durabilidade, são sem dúvida a fonte de luz mais econômica. Estas lâmpadas diferem-se pela emissão de luz branca e dourada (PREZA, 2013).

As lâmpadas de vapor de sódio são normalmente usadas em auto estradas, aeroportos, gares marítimas, e outros espaços públicos onde a acuidade visual seja muito importante, mas onde não haja necessidade de conseguir distinguir com perfeição as diferentes cores e estas lâmpadas têm uma cor alaranjada (LUZ, 2010).

c) Lâmpadas LED

O LED é um diodo semicondutor (junção P-N) que quando é energizada diretamente emite luz visível. São unidos para formar módulos que determinam a potência e o fluxo luminoso da lâmpada. Sua vida útil é de cerca de 100 mil horas. O funcionamento deste tipo de lâmpada será detalhado no Capítulo 4.

2.2.2 Reatores

O reator é um equipamento auxiliar utilizado em conjunto com as lâmpadas de descarga (lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio e vapor metálico) que tem como objetivo limitar a corrente na lâmpada e fornecer as características elétricas adequadas de fluxo luminoso e vida útil da lâmpada. Os tipos de reatores encontrados no mercado são de tipo eletromagnético e eletrônico. A Figura 5 observa-se um exemplo de reator e uma lâmpada de vapor de sódio de 70 W.

O modelo mais tradicional é o modelo eletromagnético, sendo sua construção basicamente composta por um enrolamento envolvido por um núcleo de baixa relutância que eleva o fluxo magnético a um valor suficiente para controlar a corrente elétrica (NASCIMETO, 2012). Na Figura 2 observa-se um exemplo de reator eletromagnético de uma lâmpada de vapor de sódio de 70 W.

Figura 2 - Reator eletromagnético usado em lâmpadas de descarga para iluminação pública



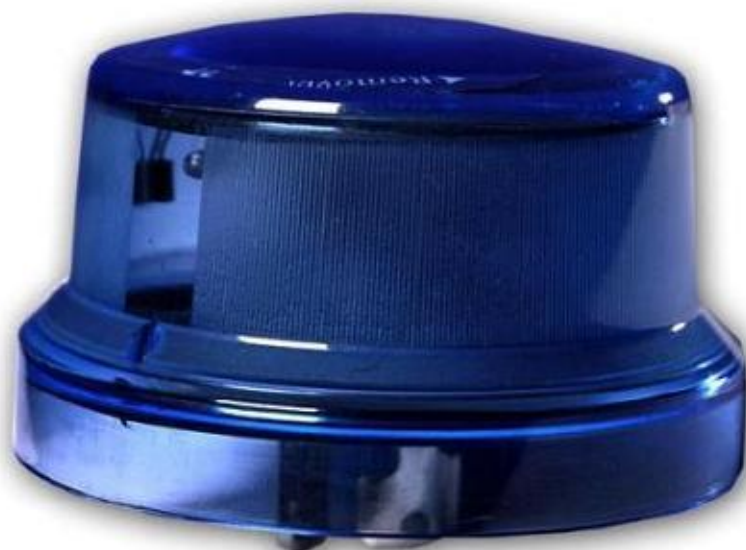
Fonte: (ENGENHARIA ELETROTÉCNICA, 2014)

2.2.3 Circuito de Comando automático

O comando automático é feito por relés fotoelétricos que comutam a carga automaticamente, tendo como referência um horário pré-determinado, normalmente no horário noturno, também podem ser usados outros circuitos de comando que são ativados pelo movimento ou pelo nível de iluminação do ambiente. Observa-se na Figura 3 um tipo de

comando automático usado em iluminação pública que é ativado quando o nível de iluminação do ambiente é baixo, normalmente no final da tarde.

Figura 3– Circuito de comando automático ativado por baixa luminosidade no ambiente

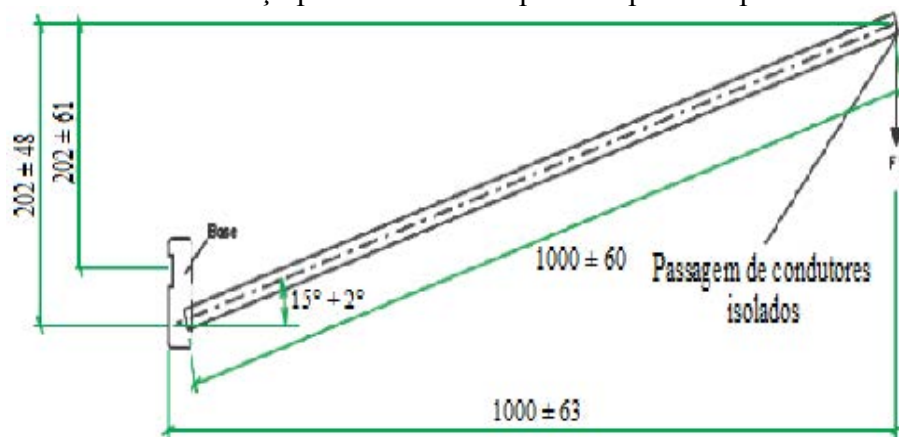


Fonte: (WORDPRESS, 2014)

2.2.4 Braços para iluminação pública

Os braços para iluminação pública são componentes metálicos e têm por função básica servir de sustentação para as luminárias e os eletrodutos usados para a fiação de conexão entre o ponto de iluminação e a rede elétrica (COPEL, 2012). A Figura 4 apresenta uma vista lateral de um modelo padrão de braço para iluminação pública para lâmpada de 70 W VSAP.

Figura 4 – Vista lateral braço padrão COPEL tipo BR-1 para lâmpada de 70 W VSAP



Fonte: (COPEL, 2012)

2.2.5 Luminárias

Têm papel extremamente importante em um sistema de iluminação, pois contribuem diretamente para uma distribuição eficiente da luz no ambiente e o conforto visual das pessoas, além manter uma boa conexão mecânica e elétrica entre as lâmpadas e os equipamentos auxiliares.

Segundo Nascimento (2012), distribuir a luz significa direcionar a luz para o local onde efetivamente ela produz algum efeito útil. Considerando a aplicação em iluminação pública, o objetivo é que a luz ilumine o leito carroçável e as calçadas, proporcionando segurança aos usuários do local. Na Figura 5, se apresentam dois exemplos de luminárias, a Figura 5a apresenta uma luminária VSAP com difusor e uma luminária LED de oito módulos na figura 5b que são usadas normalmente em iluminação pública.

Figura 5 - Modelos de luminárias VSAP e LED usadas em iluminação pública



(a) VSAP



(b) LED

Fonte: (LUCES LED, 2012)

2.2.6 Lâmpadas

A lâmpada é um dispositivo elétrico que transforma energia elétrica em energia luminosa e/ou energia térmico (PHIPLIPS, 2013).

A vida útil das lâmpadas é definida através do tempo em horas, no qual cerca de 25% do fluxo luminoso das lâmpadas testadas foi depreciado. Portanto a vida útil é o tempo recomendado para uso de uma lâmpada mantendo sua eficiência luminosa. Após o termino desse período recomendamos sua substituição, mesmo que ela ainda esteja funcionando. Observa-se na Figura 6 uma lâmpada de vapor de sódio tubular usada em iluminação pública convencional.

Figura 6 – Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão tubular



Fonte: (ILUMINACION.NET, 2014)

2.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram abordadas as diferentes normas Técnicas que regulam a iluminação pública, como a Norma NBR 5101 de 2012 que estabelece os requisitos, componentes e conceitos básicos na iluminação de vias, assim como algumas Normas internacionais. Foram ressaltadas as vantagens das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, comumente usadas em comparação com as outras lâmpadas de descarga e das lâmpadas LED que devido a suas vantagens de vida útil e consumo de energia, a troca de VSAP por LED, são cada vez mais frequentes na iluminação pública Brasileira.

Foram apresentados os elementos que compõem um módulo de iluminação pública, com suas respectivas funções no sistema e que serão tidos em conta em capítulos próximos para determinar o custo do investimento inicial para a conexão em corrente alternada e corrente contínua.

3 ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM LOTEAMENTO RESIDENCIAL

Este capítulo descreve um circuito de iluminação pública, segundo os requerimentos exigidos pela norma NBR 5101 de 2012. São apresentados os cálculos do circuito em corrente alternada, com os respectivos custos de investimento inicial, assim como o valor do *kWh* para um horizonte de 25 anos. Este circuito servirá de comparativo para uma proposta de iluminação pública em corrente contínua, tanto para 12 Vcc quanto para 24 Vcc, garantindo o cumprimento das normas de iluminação pública para a classificação da via escolhida e das diferentes normas para cada um dos componentes elétricos do sistema.

3.1 APRESENTAÇÃO DO CIRCUITO CASO EM CORRENTE ALTERNADA

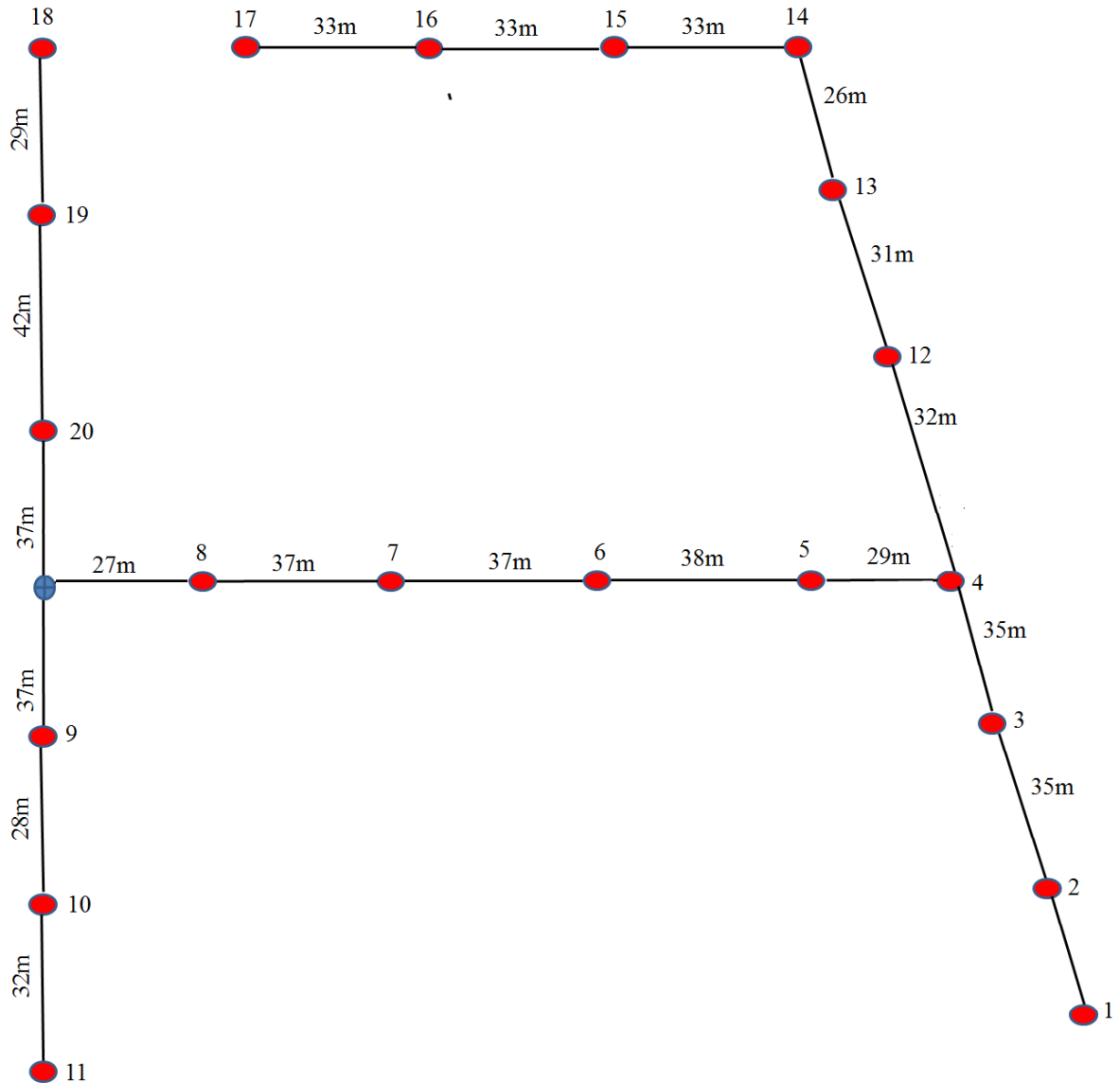
3.1.1 Descrição da rede caso

A rede caso situa-se no loteamento urbano morada do sol, localizado na cidade de Ilha Solteira - São Paulo, onde serão analisados 20 nós, que compõem um sistema maior, de 297 pontos e iluminação temos as seguintes características geográficas:

- a) Velocidade média do ar 4,7 m/s;
- b) Altitude de 335 m;
- c) Umidade relativa do ar média de 72,3%;
- d) Temperatura mínima 24 °C;
- e) Temperatura máxima 40 °C;
- f) Temperatura média 32 °C.

Para este trabalho foi considerada apenas uma parte do circuito composto por 20 nós de um total de 297 nós, conforme a Figura 7, onde é apresentada a distância entre os postes de cor vermelha com numeração dos nós de um a vinte. A Figura 7 apresente um poste de apoio na ramificação entre os nós oito, nove e vinte, de cor azul.

Figura 7 - Circuito caso com a distância entre os postes e numeração de cada nó



Fonte: (ILHA SOLTEIRA, 2013)

3.1.2 Descrição elétrica e construtiva do projeto

Para o circuito em corrente alternada têm-se as seguintes características elétricas de todos os seus componentes:

- a) Tensão Nominal: 220 Vca
- b) Número de fases: 2
- c) Transformada de 5 kVA e frequência 60 Hz

- d) Conexão com neutro aterrado
- e) Serviço de 12 horas
- f) Lâmpadas de VSAP 70 W
- g) Consumo total de todo o módulo de iluminação, tendo em conta o reator, ignitor, capacitor e transformador da lâmpada de 86 W
- h) A localização dos postes tem uma distância horizontal definida na Figura 9 e com 8 m de altura
- i) Para a conexão em corrente alternada serão dois condutores com seção transversal de 4 mm² de cobre (Cu), para uma rede aérea
- j) As lâmpadas serão de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 70 W, IP 65, com circuito de comando por meio de relés fotoelétricos
- k) Módulo de IP é IP-01/70S o qual é usado para VSAP de 70 W, as quais poderão ser de tela de proteção contra atos de vandalismo
- l) Via de uso residencial com tráfego de pedestres e veículos leve, com uma iluminância⁵ mínima de 0,4lux, Nascimento (2012), tomado de ABNT (1992)
- m) Aterramento de cobre categoria T1 para cargas instaladas menores que 75 kW de 10 mm² (ABNT-NBR, 2004)
- n) O ignitor, segundo dados do fabricante, para uma VSAP de 70 W tem as seguintes características:
 - Tensão nominal de 220 Vca
 - Frequência nominal de 60 Hz
 - Tensão de pulso de 4,5 kV

3.2 CÁLCULO DO PROJETO EM IP CONVENCIONAL

Na elaboração e apresentação do projeto tem-se os seguintes cálculos:

Para a obtenção da carga útil é necessário usar a seguinte Equação:

$$C_g = \frac{N_{ICA} * P_{mCA}}{1000} \quad (1)$$

⁵ Iluminância (*L*): É a Intensidade Luminosa (cd) que emana de uma superfície (m²), pela sua superfície numa dada direção aparente. Pode ser definida como a luz que efetivamente chega à visão do usuário, sua unidade é a candela (cd/m²) (SCHUEDA, 2011).

Sendo:

C_g = Carga instalada

N_{ICA} = Número de lâmpadas de VSAP = 20

P_{ICA} = Potência das luminárias de VSAP = 70

P_{mCA} = Potência de cada módulo de iluminação em corrente alternada

Da Equação (1), obtém-se:

$$C_g = \frac{20 * 86}{1000} = 1,72 \text{ kW}$$

O cálculo da queda de tensão para um cabo de cobre de 4 mm² isolado, com uma resistência de 0,0033 Ω/m e limite máximo para a queda de tensão de 3%, em condições normais de operação, é obtido através da Equação (2).

$$\Delta V = \frac{2R_c I_l}{V} * 100 \% \quad (2)$$

Sendo:

V = Tensão da fonte.

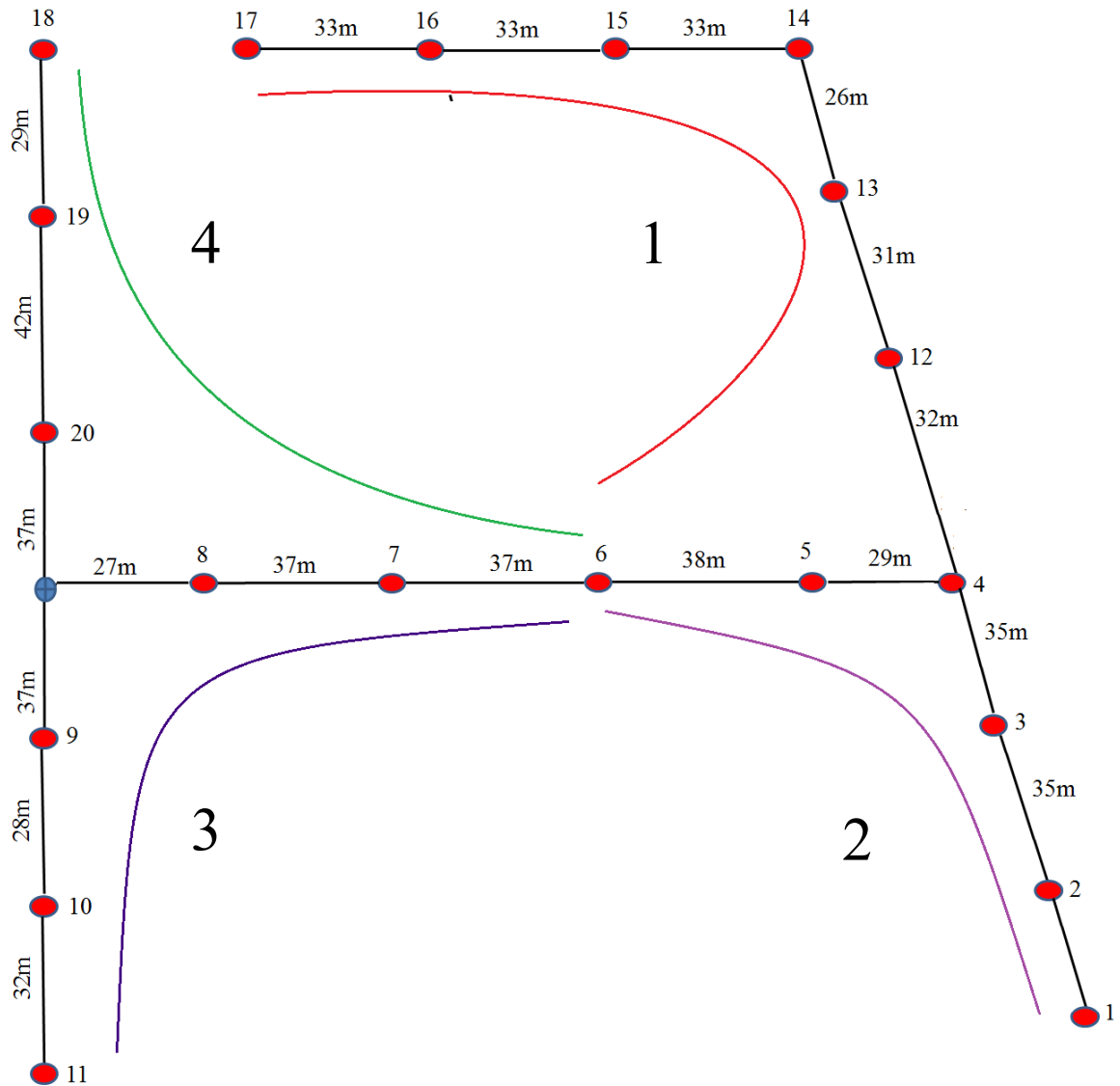
I_l = Corrente que flui pelo condutor em Ampères.

R_c = Resistencia do condutor em Ω/m.

Coloca-se o transformador no nó seis, para efeito de regulação⁶, assim como se apresenta na Figura 8 e divide-se o circuito em quatro ramos para realizar os cálculos de queda de tensão em Volts e perdas em Watts para cada um dos caminhos da corrente.

⁶ Regulação: São os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente.

Figura 8 - Fluxo de corrente no circuito caso



Fonte: Do próprio autor.

Para o cálculo do ramo um tem-se o seguinte:

Para seis lâmpadas correspondentes aos nós 12, 13, 14, 15, 16 e 17 de 70 W, e uma potência total para todos os PI de 86 W cada, e tensão de 220 Vca e da Equação (2), tem-se:

$$C_{g1} = 6 * 86 = 0,516 \text{ kW}$$

A partir da Equação três, obtém-se a Equação quatro para determinar o valor da corrente para cada ramo (W_{Ramo}).

$$W_{Ramo} = V * I \quad [W] \quad (3)$$

$$I = \frac{W_{Ramo}[W]}{V[V]} \quad [A] \quad (4)$$

$$I_1 = \frac{0,516 \text{ kW}}{220 \text{ V}}$$

$$I_1 = 2,3454 \text{ A}$$

Com o valor da corrente obtido da Equação (4), calcula-se ΔV por meio da Equação (2)

$$\Delta V = \frac{2 * \frac{0,0033\Omega}{\text{m}} * 188\text{m} * 2,3454}{220 \text{ V}} * 100 \%$$

$$\Delta V = 1,3228 \%$$

Quanto às perdas, tem-se:

$$P = 2 I^2 * Rc \quad [W] \quad (5)$$

$$P_1 = 2 * 2,3454^2 * 0,0033$$

$$P_1 = 0,0363 \text{ W}$$

Assim, de igual forma para os ramos 2, 3 e 4:

Para o ramo dois igual aos nós 6, 5, 4, 3, 2 e 1, os resultados são:

$$C_{g2} = 6 * 86 = 0,516 \text{ kW}$$

$$I_2 = 2,3454 \text{ A}$$

$$\Delta V = \frac{2 * \frac{0,0033\Omega}{\text{m}} * 173\text{m} * 2,3454}{220 \text{ V}} * 100 \%$$

$$\Delta V = 1,2172 \%$$

$$P_2 = 0,0363 \text{ W}$$

Para o ramo três correspondente aos nós 7, 8, 9, 10 e 11, os cálculos são:

$$C_{g3} = 5 * 86 = 0,430 \text{ kW}$$

$$I_3 = \frac{0,430 \text{ kW}}{220}$$

$$I_3 = 1,9545 \text{ A}$$

$$\Delta V = \frac{2 * \frac{0,0033\Omega}{\text{m}} * 198\text{m} * 1,9545}{220 \text{ V}} * 100 \%$$

$$\Delta V = 1,161 \%$$

$$P_3 = 0,0129 \text{ W}$$

E finalmente para o ramo quatro correspondente aos nós 18,19 e 20, os resultados são:

$$C_{g4} = 3 * 86 = 0,258 \text{ kW}$$

$$I_4 = \frac{0,258 \text{ kW}}{220}$$

$$I_4 = 1,1727 \text{ A}$$

$$\Delta V = \frac{2 * \frac{0,0033\Omega}{\text{m}} * 198\text{m} * 1,1727}{220 \text{ V}} * 100 \%$$

$$\Delta V = 0.6965 \%$$

$$P_4 = 0,0090 \text{ W}$$

As perdas totais (P_T) no circuito caso dos quatro ramos correspondem à soma de P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , portanto:

$$P_T = 0,0945 \text{ W}$$

Para determinar o consumo total de energia usa-se a Equação (6):

$$C_m = C_{gt} * N_d * F_m * F_u * T_{on} \quad (6)$$

Sendo:

C_m = Consumo mensal

C_{gt} = Carga instalada total

N = Número de dias do mês = 30

F_m = Fator de manutenção = 0,896

F_u = Fator de utilização = 0,5

T_{on} = Tempo que fica acesa a lâmpada em horas (ANEEL, 2012) = 12

Portanto:

$$C_m = 1,72 * 30 * 0,896 * 0,5 * 12$$

$$C_m = 277,4016 \text{ kWh}$$

Para o custo da demanda e segundo dados da Resolução Normativa nº 547/2013, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL que define o sistema de bandeiras tarifárias segundo as condições e período de geração.

O sistema de bandeiras tarifárias tem como finalidade sinalizar aos consumidores faturados pela distribuidora, por meio da Tarifa de Energia, os custos atuais da geração de energia elétrica, este sistema terá um ano teste, ou seja, a partir do 2014, período em que a ANEEL deve divulgar os procedimentos de aplicação do sistema de bandeiras. As bandeiras tarifárias são três:

- a) Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;
- b) Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis;
- c) Bandeira vermelha: condições mais custosas de geração.

O custo da demanda para uma bandeira tarifária amarela, para condições de geração menos desfavoráveis e segundo Resolução Homologatória nº 1507, de 05 de abril de 2013, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o valor da tarifa é a soma do valor TUSD (Tarifas de uso do Sistema de Distribuição) + TE (tarifa de Energia), ou seja, R\$ 0,323 (Trinta e dois centavos), além das contribuições PIS – COFINS de 0,4702 % e 2,1656 % respectivamente, para janeiro de 2014, para um valor total aproximado do kWh de R\$ 1,05 (um real e cinco centavos).

Para um consumo mensal de 277,4016 kWh, para a conexão em corrente alternada vai ser aproximadamente:

$$C_m = 277,4016 * 1,05 = \mathbf{R\$ 291,28}$$

Na Tabela 2, são apresentados os valores dos componentes e investimento inicial para os 20 nós do circuito caso em corrente alternada:

Tabela 2 - Custos o investimento inicial do circuito caso para os 20 nós em corrente alternada

ITEM	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo total
Aterramento completo	Und	5	R\$ 189,86	R\$ 949,30
Postes de 8 Metros	Und	20	R\$ 291,16	R\$ 5.823,20
Luminárias com braço de fixação	Und	20	R\$ 376,50	R\$ 7.530,00
Lâmpadas de VSAP 70 W	Und	20	R\$ 159,70	R\$ 3.194,00
Equipamento auxiliar	Und	20	R\$ 92,24	R\$ 1.844,80
Controle	Und	10	R\$ 75,00	R\$ 750,00
Cabo PP 2X4 Preto 750V	M	671	R\$ 4,68	R\$ 3.140,28
Transformador	Und	1	R\$ 999,00	R\$ 999,00
TOTAL				R\$ 24.230,58

Fonte: Do próprio autor.

Baseando-se na vida útil e tomando como exemplo as lâmpadas VSAP, seria necessário a troca a cada cinco anos, devido a sua vida útil. Portanto, em um horizonte de 25 anos, haveria a necessidade de substituição das lâmpadas por cinco vezes. Assim, tendo em conta o investimento inicial, ou seja, a primeira instalação vai precisar de quatro trocas e, multiplicando pelo valor das vinte lâmpadas da Tabela 2 por quatro, o custo total seria de R\$ 12.776,00 (Doze mil setecentos e setenta e seis). O mesmo raciocínio se aplica ao equipamento auxiliar e ao sistema de controle.

Também se leva em consideração no custo total do circuito uma a porcentagem de manutenção 10% anual.

O custo do *kWh*, calculado anteriormente, para o horizonte de 25 anos, será estimado com a inflação acumulada no Brasil de 2013 em 5,91% (IBRE, 2014), baseada no índice de preços do consumidor (IPC)⁷, porcentagem usada para o valor futuro do custo da demanda.

A Tabela 3 apresenta o custo total do circuito em corrente alternada para um horizonte de 25 anos segundo os raciocínios anteriores é:

Tabela 3 – Custo de vida útil do circuito em corrente alternada

Item	Custo	Custo para Horizonte de 25 Anos
Lâmpadas de VSAP de 70 W	\$ 3.194,00	\$ 12.776,00
Equipamento auxiliar	\$ 1.844,80	\$ 7.379,20
Controle	\$ 750,00	\$ 3.000,00
Investimento inicial		\$ 24.230,58
Custo de energia		\$ 15.040,00
Manutenção		\$ 4.739,00
TOTAL		\$ 67.164,78

Fonte: Do próprio autor.

3.3 CONCLUSÃO

No Capítulo 3 foram descritas as características elétricas e construtivas do circuito em corrente alternada, apresentando-se o equacionamento para cálculo das perdas por efeito Joule do circuito e o consumo. O custo da demanda anual foi calculado para uma bandeira tarifária amarela, segundo a resolução ANEEL 547 (2013) e da resolução homologatória 1507 de 2013, para os custos TUSD e TE do *kWh*

Para o caso tomado como exemplo, o custo do circuito, para um horizonte de 25 anos, foi de aproximadamente R\$ 67.200,00 (sessenta e sete mil e duzentos reais), que inclui o investimento inicial de R\$ 24.230,00 (vinte quatro mil, duzentos e trinta reais), troca de elementos mais relevantes do circuito, vida útil de lâmpadas, controle e equipamento auxiliar,

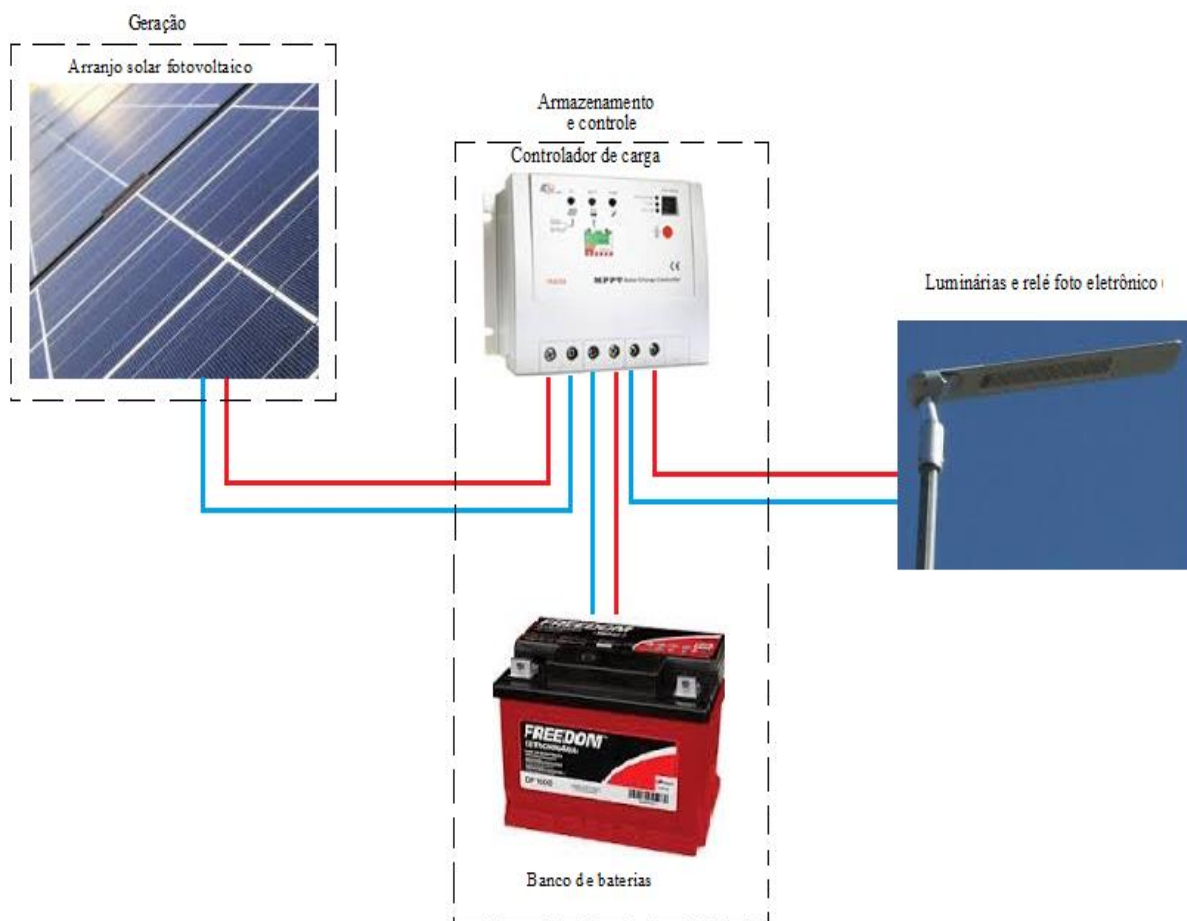
⁷ Índice de Preços ao Consumidor (IPC): mede a variação de preços de um conjunto fixo de bens e serviços componentes de despesas habituais de famílias com nível de renda situado entre 1 e 33 salários mínimos mensais.

um pouco mais de R\$ 4.700 (quatro mil setecentos reais) de manutenção e o custo da demanda baseado num valor futuro para este mesmo tempo, como um valor de referência de inflação de 2013 de 5,91% de R\$ 14.748,00 (quatorze mil setecentos e quarenta e oito reais).

4 PROPOSTA DO TRABALHO: ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM CORRENTE CONTÍNUA EM LOTEAMENTOS URBANOS

No Capítulo 4 apresenta-se a proposta deste trabalho que tem como objetivo o dimensionamento de um sistema autônomo isolado de iluminação pública em corrente contínua com seu tempo de retorno, em comparação com um circuito em corrente alternada, para IP em loteamentos urbanos. Como referência, será utilizado o mesmo loteamento apresentado no Capítulo 3. Os elementos principais que compõem o sistema em corrente contínua são apresentados na Figura 9.

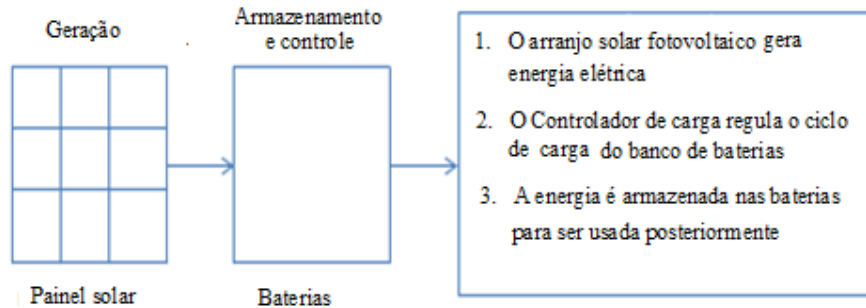
Figura 9 – Conexão do sistema autônomo isolado de iluminação pública em corrente contínua



Fonte: Do próprio autor.

A Figura 10 apresenta o funcionamento geral do sistema durante o dia, mostrando as etapas de captação solar, geração, armazenamento e conversão da energia para ser usada.

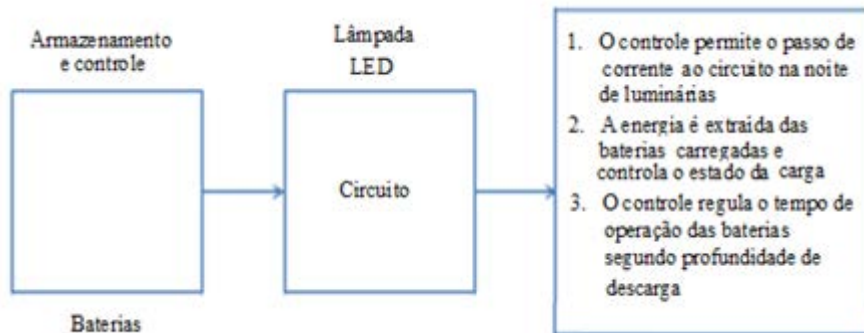
Figura 10- Operação do sistema autônomo isolado de iluminação pública durante o dia



Fonte: Do próprio autor.

Apresenta-se na Figura 11, o funcionamento do sistema microgerador que vai garantir energia para o circuito caso.

Figura 11 - Operação durante a noite



Fonte: Do próprio autor

4.1 COMPONENTES E DEFINIÇÕES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os principais componentes para iluminação pública em corrente contínua, utilizando geração fotovoltaica, são os seguintes:

- a) Painéis solares fotovoltaicos;
- b) Banco de baterias;
- c) Reguladores de carga;
- d) Luminárias e lâmpadas tipo LED.

4.1.1 Painel solar fotovoltaico

Os painéis solares fotovoltaicos são compostos por células de que absorvem a energia do sol e fazem a corrente elétrica fluir entre duas camadas com cargas opostas através do efeito fotovoltaico (SERRÃO, 2010).

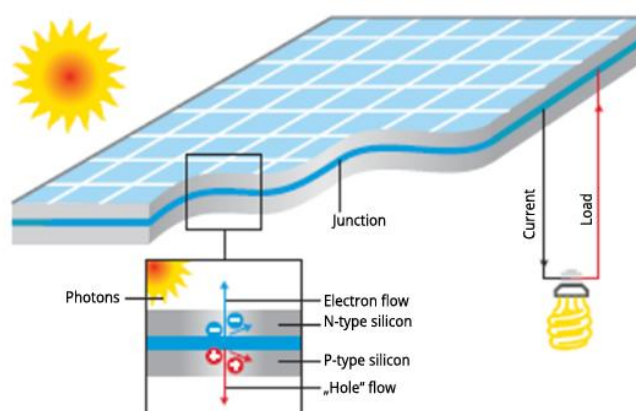
A célula solar fotovoltaica cria uma diferença de potencial por ação da luz. As células solares contam com o efeito fotovoltaico para absorver a energia do sol e fazem a corrente elétrica fluir entre duas camadas com cargas opostas.

Cada célula solar compõe-se de uma camada de material tipo N e outra camada maior de material tipo P, formando uma junção P-N, que ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores (NASCIMENTO, 2004).

Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, segundo Nascimento (2014) os elétrons são orientados e fluem da camada P para a camada N, por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica).

Em quanto à luz estiver incidindo na célula, o fluxo se manterá e variará na mesma proporção a intensidade da luz incidente. A Figura 12 apresenta os componentes de uma célula solar fotovoltaica e como o efeito fotovoltaico cria uma corrente.

Figura 12 – Componentes e princípio de funcionamento de uma célula fotocélula



Fonte: (POWERCLOUDS, 2014)

Os fabricantes fornecem as especificações dos principais parâmetros de um módulo solar considerando a condição padrão de teste STC (*Standard Test Condition*), definida pela norma IEC 6125 e tomada por (SEGUEL, 2009), onde se define:

- a) Irradância = 1000 W/m²;
- b) Massa do ar 1.5 kg/m³;
- c) Temperatura das células de 25°C.

Os parâmetros elétricos, próprios de cada painel solar e que ajudam na escolha do sistema apropriado, são:

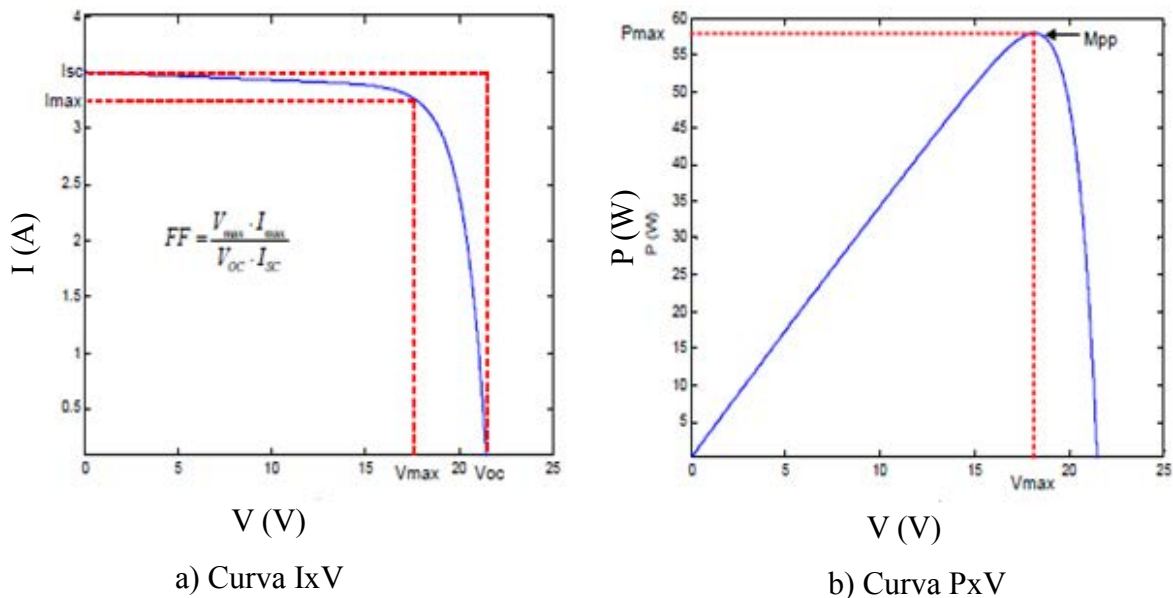
- a) Ponto de Máxima Potência (MPP)
É o produto da corrente fornecida pelo painel e da tensão nos terminais de saída. Representa a potência gerada para um determinado ponto de operação, onde a máxima potência pode ser alcançada, para determinada condição climática;
- b) Tensão de máxima potência (V_{max})
Corresponde à tensão no ponto de máxima potência;
- c) Corrente de máxima potência (I_{max})
Corresponde à corrente no ponto de máxima potência;
- d) Corrente de curto – circuito (I_{sc})
É o valor máximo de corrente de carga, ou seja, a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico;
- e) Tensão de circuito aberto (V_{oc})
É o maior valor de tensão nos terminais do módulo fotovoltaico quando não tem nenhuma carga conectada nele;
- f) Fator de Forma (FF)
Definido pela relação entre a potência no MPP e o produto da corrente de curto-circuito pela tensão de circuito aberto. Valores usuais para as fotocélulas ficam em 70% e 80%. Esta é uma medida que expressa quanto se aproxima uma curva característica a uma curva I-V.

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos são apresentadas na Figura 11. A curva IxV da Figura 13 (a), a máxima corrente fornecida pelo módulo é a corrente de curto-circuito (I_{sc}), mas sua potência é zero, pois a tensão nominal nos terminais é 0 V. De igual

forma, a tensão máxima ocorre com a tensão de circuito aberto (V_{oc}), mas a potência é novamente igual a zero pois, para esse valor, a corrente é A.

Na curva PxV da Figura 13 (b), pode-se observa que existe somente uma tensão (e correspondente corrente), para a qual a potência máxima pode ser extraída. O ponto de potência máxima corresponde, então, ao produto da tensão de potência máxima (V_{max}) e corrente de potência máxima (I_{max}) (CEPEL-CRESESB, 2004). O módulo se comporta como uma fonte de corrente até o valor de MPP, depois deste valor de (I_{max}), começa a descer exponencialmente o que faz diminuir a potência rapidamente, (SEGUEL, 2009).

Figura 13 - Características elétricas dos painéis fotovoltaicos com condição padrão de teste



Fonte: (SEGUEL, 2009)

4.1.2 Baterias

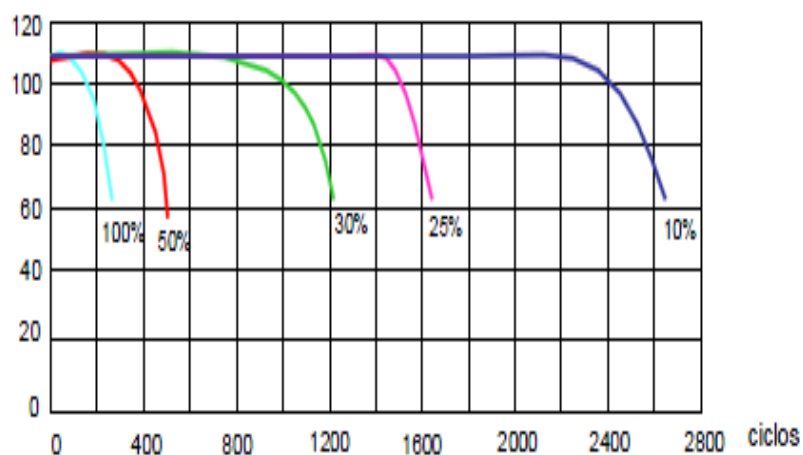
As baterias eletroquímicas são uma importante forma de armazenamento de energia que podem ser utilizadas em sistemas fotovoltaicos, pois são capaz de transformar diretamente energia elétrica em energia potencial química e posteriormente converter diretamente, a energia potencial química em energia elétrica (SEGUEL, 2009).

A principal função das baterias num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que é produzida durante as horas de luminosidade, que será utilizada durante anoite ou períodos de mal tempo.

A capacidade da bateria é quantificada de acordo com a quantidade de corrente que ela consegue oferecer por hora. Por exemplo, teoricamente, uma bateria de 200 Ah deve ser capaz de fornecer corrente de 200 A durante 1 hora, ou 50 A por 4 horas, e assim por diante. Um fator que influencia a capacidade da bateria é a velocidade de carga ou descarga. Quanto mais lento for o descarregamento, ligeiramente maior será a sua disponibilidade de carga e vice-versa. Os fabricantes normalmente fornecem a capacidade para cada regime de descarga.

A grandeza vida útil das baterias está diretamente ligada à profundidade de descarga, que é dada em termos percentuais, relativa a quanto da capacidade nominal da bateria foi retirada a partir do estado de plena carga. Por exemplo, a remoção de 25 Ah de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah resulta em uma profundidade de descarga de 25 %, vai ter um pouco mais de 1600 (mil e seiscentos) ciclos, assim como ilustra a linha roxa da Figura 12 e assim igual raciocínio para as curvas vermelha, verde e azul. É o valor complementar do estado de carga (CEPEL - CRESESB, 2004), assim como se observa na Figura 14.

Figura 14 – Grandeza vida útil da bateria para diferentes percentagens de profundidade de descarga



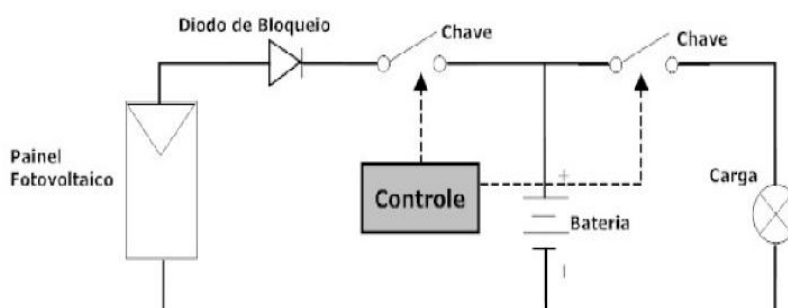
Fonte: (FREEDOM, 2008)

4.1.3 Controlador de carga

Os controladores de carga têm a função de controlar o fluxo de energia que carrega as baterias através da energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos, evitando assim que as mesmas sejam excessivamente carregadas ou descarregadas. Isso contribui para o aumento da vida útil do sistema de armazenamento (SERRÃO, 2010). Os Controladores modernos utilizam uma tecnologia chamada PWM (*Pulse With Modulation*) ou modulação por pulsos ou ainda a tecnologia MPPT – *Maximum Power Point Tracking* para assegurar que a bateria possa ser carregada até atingir sua capacidade máxima.

O controlador de carga apresentado na Figura 15, usa diodos de bloqueio que não permitem circulação de corrente reversa. Em geral, possuem uma chave que desliga a carga, caso a tensão baixe em determinado nível e outra chave que evita que as baterias sejam sobrecarregadas, desligando o circuito dos geradores, curto-circuitando os painéis.

Figura 15 - Funcionamento do controlador de carga



Fonte: (SANTOS, 2010)

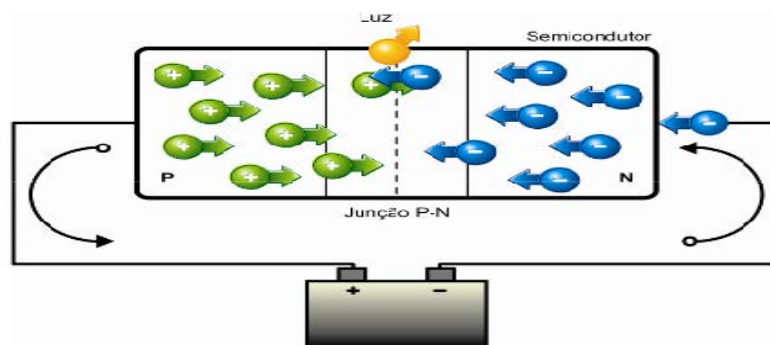
4.1.4 Luminárias y lâmpadas LED

As luminárias têm papel extremamente importante em um sistema de iluminação, pois elas contribuem diretamente para uma distribuição eficiente da luz no ambiente e o conforto visual das pessoas (PHILIPS, 2013), além de manter uma boa conexão mecânica e elétrica entre as lâmpadas e os equipamentos auxiliares.

As lâmpadas LED (Light Emitting Diodes - diodos emissores de luz), são componentes eletrônicos de estado sólido, compostos por materiais semicondutores tipo P e tipo N, que convertem energia elétrica em radiação luminosa.

O princípio de funcionamento do LED do tipo bipolar, ou seja, com um anodo (P) e um catodo (N), é ilustrado na Figura 16, onde a junção P-N polarizada diretamente permite recombinações de lacunas e elétrons (corrente). Essa recombinação libera em forma de calor ou fótons de luz. Este fenômeno é chamado eletroluminescência (PINTO, 2008).

Figura 16 - Princípio de funcionamento do diodo LED



Fonte: (PINTO, 2008)

Do ponto de vista dos projectos de iluminação pública os LEDs que têm interesse são os chamados LEDs de alta luminância ou alta potência, também conhecidos como HBLEDs (high-brightness light-emitting diodes, da nomenclatura inglesa) de luz branca.

Para a produção de luz branca, ou da sensação de luz branca, é necessária uma emissão que abranja comprimentos de onda em todo o espectro de radiação visível, ou pelo menos nas regiões das cores vermelha, verde e azul (cores primárias). Desenvolveram-se então dois métodos para a produção de luz branca (LOREIRO, 2010).

Um deles consiste em revestir um LED de alta potência emitindo na região da luz azul, ou até dos ultravioletas, com materiais fosfóricos que quando excitados por radiação dentro destes comprimentos de onda produzem radiação numa região alargada do espectro, produzindo então luz branca (LOREIRO, 2010).

Segundo Loreiro (2010) o outro processo de obtenção de luz branca consiste na utilização de três LEDs, um deles emitindo na região do espectro correspondente à luz vermelha, outro na região da luz verde e o último na região de luz azul. Deste modo é possível produzir a sensação de luz branca, ou até de qualquer outra cor. Variando o fluxo

emitido pelos LEDs obtém-se uma mistura de radiação diferente e, por consequência, diferentes temperaturas de cor.

Embora o segundo método ofereça uma maior flexibilidade do que o primeiro, anteriormente descrito, ele é pouco utilizado em aplicações de iluminação, uma vez que é mais caro, além disso, os LEDs sofrem degradações diferentes ao longo da vida útil (LOREIRO, 2010).

Os LEDs utilizados para iluminação possuem normalmente no seu encapsulamento um sistema de lentes para que se consiga um maior ângulo de abertura da luz emitida.

As luminárias baseadas em tecnologia LED resultam normalmente de uma associação de vários LEDs conformando módulos que podem ser facilmente trocados e não do seu uso isolado. A Figura 17 apresenta uma lâmpada de LEDs de alta luminância ou alta potência de luz branca e cinco módulos de LEDs

Figura 17 - Lâmpada de LEDs de alta luminância ou alta potência de luz branca e 5 módulos substituíveis de LEDs



Fonte: (DECOLARES, 2014)

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para o dimensionamento do sistema primeiramente devem-se definir os dados de tensão nominal do sistema, potência demandada pela carga, tempo que as lâmpadas estarão acesas (perfil de carga), localização geográfica do sistema, que é igual ao definido para corrente

alternada, fazer uma avaliação do recurso solar (UNESP, 2013). Além da descrição do modelo matemático usado para alocar os geradores fotovoltaicos no circuito caso que fornecerão a energia necessária para satisfazer o consumo das lâmpadas durante o período na noite o de baixa luminosidade e assim criar uma mini rede de distribuição distribuída a partir destes geradores. As características consideradas são as seguintes:

- a) Luminárias de tecnologia LED de 30 W de alto brilho de 12 ou 24 Vcc (segundo o caso). Estes valores de tensão são escolhidos, pois no mercado só existem baterias de ciclo profundo de 12 V e para tensões maiores de 24 o banco de bateria fica robusto, aumentando o custo do sistema;
- b) 12 horas de consumo diários;
- c) Latitude 20°25'58" sul e a uma longitude 51°20'33" oeste, estando a uma altitude de aproximadamente 335 metros;
- d) Autonomia prevista de dois (2) dias.

Antes do dimensionamento dos sistemas é importante fazer uma descrição do modelo matemático usado para alocar os geradores solares fotovoltaicos no circuito.

4.2.1 Descrição modelo matemático

Para alocação de sistemas solares fotovoltaicos para microrredes autônomas em corrente contínua, através de um modelo matemático escrito como um problema quadrático inteiro misto descrito da seguinte forma (FAGUNDES, 2013).

$$I g_i - \sum_{i,j \in \Omega l, i \in \Omega b} G_{ij} \cdot V_i = 0 \quad \forall_i \in \Omega b \quad (7)$$

$$\frac{(V_i - V_j)}{R_{ij}} \leq I_{m\acute{a}x} \quad \forall_i \in \Omega b, \forall_{i,j} \in \forall_i \in \Omega l \quad (8)$$

$$V_{min}(1 - n_i) + VN \cdot n_i \leq V_i \quad \forall_i \in \Omega b \quad (9)$$

$$V_i \leq VN \quad \forall_i \in \Omega b \quad (10)$$

$$I g_i \leq n_i \cdot IPT \quad \forall_i \in \Omega b \quad (11)$$

$$\sum_{i \in \Omega b} n_i \leq n_{min} \quad (12)$$

$$n \in \{0,1\} \quad (13)$$

Nesse modelo Ωb e Ωl são os conjuntos de nós, e conjunto de linhas respectivamente, n_i é a variável binária de alocação do gerador solar no nó i , V_i é a tensão no nó i , V_j é a tensão no nó j , $Ig_i(A)$ é a corrente gerada pelo gerador solar, G_{ij} é a matriz das condutâncias, $I_{m\acute{a}x}(A)$ é a corrente máxima permitida pelos condutores, VN é a tensão nominal, IPT máxima corrente fornecida pelo painel solar e N_{min} é o número permitido de painéis solares a serem instalados no sistema.

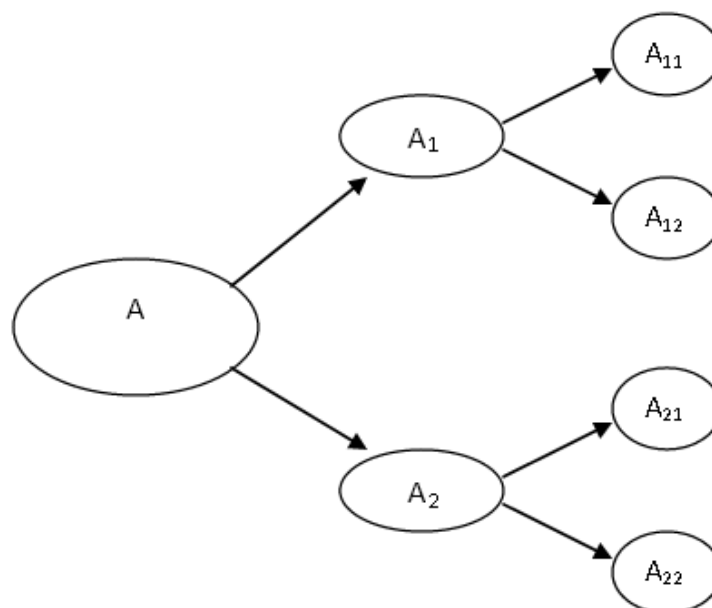
A restrição (7) é a equação de balanço que representa a primeira lei de Kirchhoff. A restrição (8) representa o limite de corrente entre as linhas ij do sistema. As restrições (9) e (10) definem o perfil de tensão para cada nó do sistema, ou seja, a tensão é mantida dentro dos limites toleráveis. A restrição (11) garante que a corrente a ser gerada seja menor ou igual a corrente máxima gerada pelos painéis solares. A restrição (12) permite limitar o número total de geradores solares alocados no sistema. A característica binária de alocação de painéis solares nos nós do sistema é definida em (13).

Para a solução do problema de Programação Quadrático Inteiro Misto (PQIM), foi feita a implementação do modelo através da linguagem de modelagem algébrica AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) e solucionado usando o solver CPLEX que faz uso do algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B), onde segundo Rendón (2007) é um algoritmo utilizado para Programação Linear Inteira Mista. Diante disso (ILOG, 2008), fala do uso do software de otimização CPLEX, o qual pode ser usado para resolver um PQIM, desde que sejam atendidas as seguintes condições:

- a) Todas as restrições devem ser lineares;
- b) A função objetivo de ser a soma termos, onde os termos são lineares e quadráticos;
- c) Para todos os valores das variáveis (que satisfaçam ou não as restrições), a parte quadrática da função objetivo deve ter um valor positivo se o problema é de minimização ou um valor negativo caso o problema seja de maximização.

A Figura 18 apresenta a ramificação ou divisão Branch and Bound (B&B), que consiste em dividir o problema inicial ou principal em subproblemas cada vez menores e assim determinar a solução mais factível e garantir um *mipgap* de boa qualidade.

Figura 18 – Divisão ou ramificação Branch and Bound (B&B)



Fonte: Do próprio autor.

4.2.2 Dimensionamento para 12 Vcc

Para uma carga instalada de 600 W, resultado de vinte lâmpadas de 30 W cada e 12 horas, tempo que estará ligado o sistema autônomo de iluminação pública para um consumo de energia diário de 7,2 kWh.

Para a alocação dos geradores fotovoltaicos primeiro define-se os dados de entrada para o algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B), que definirá os nós de geração ótimos do circuito caso assim:

- a) Tensão Nominal do sistema;
- b) Número de nós;
- c) Distância entre os postes;
- d) Percentagem de regulação, que para este caso foi de 3%.

Segundo o algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B), e levando em conta as características e restrições do circuito, a solução ótima alocou sete geradores fotovoltaicos nos nós 2, 4, 7, 10, 13, 16 e 19, representados por o numero um e uma tensão de 12 Vcc, nos outros nós têm-se uma queda de tensão máxima permitida de 3%, conforme a

Tabela 4, com a e a potência mínima (P_m) em W, a ser gerada por cada nó de alocação para fornecer energia para o circuito caso.

Tabela 4 – Tensão nos nós de alocação e potência a ser gerada

Nó	Tensão	Alocação	P_m [W]
1	11,84717	0	0,0000
2	12,00000	1	74,5245
3	11,92522	0	0,0000
4	12,00000	1	91,5249
5	11,86724	0	0,0000
6	11,85487	0	0,0000
7	12,00000	1	84,6008
8	11,85557	0	0,0000
9	11,87124	0	0,0000
10	12,00000	1	91,7421
11	11,86396	0	0,0000
12	11,93267	0	0,0000
13	12,00000	1	77,1053
14	11,88092	0	0,0000
15	11,87028	0	0,0000
16	12,00000	1	85,8826
17	11,86540	0	0,0000
18	11,87162	0	0,0000
19	12,00000	1	90,4613
20	11,83043	0	0,0000

Fonte: Do próprio autor.

Na Tabela 5, apresenta-se a potência mínima (P_m) em W a ser gerada por cada nó de alocação, calculada mediante o algoritmo de otimização clássica, para fornecer a energia necessária para o funcionamento do sistema:

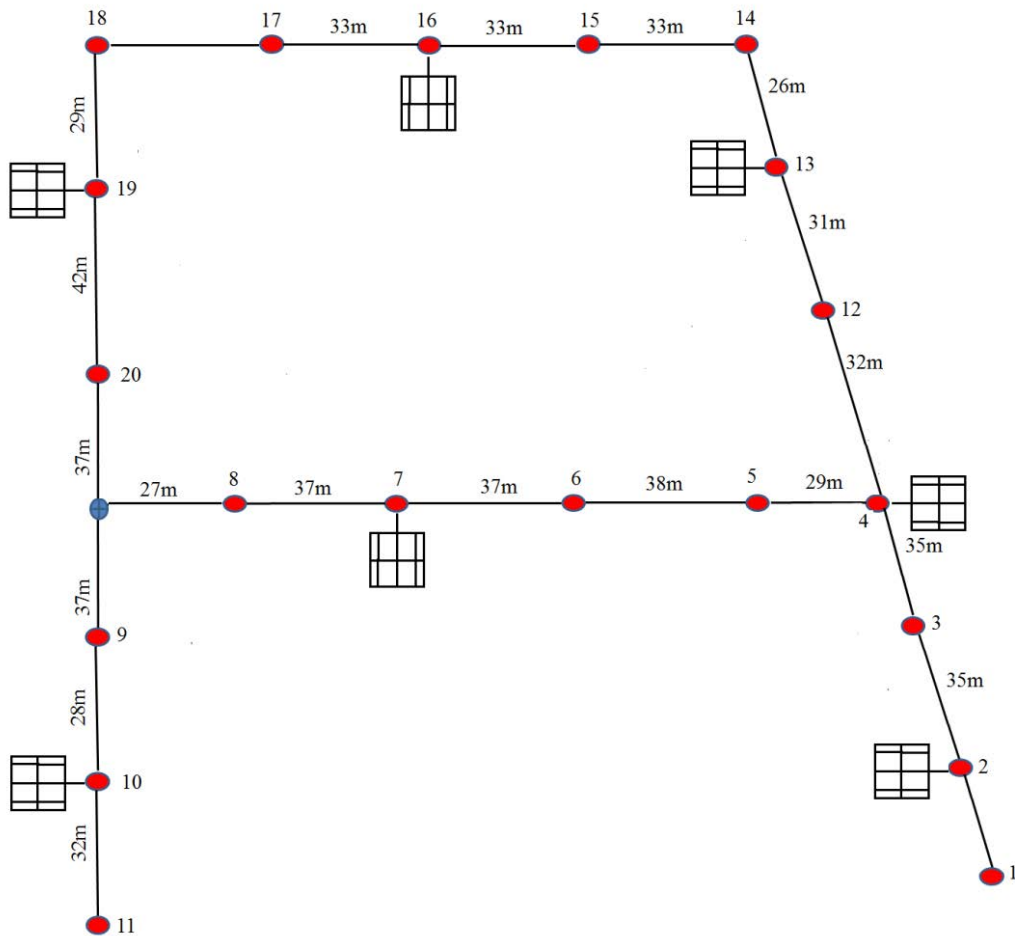
Tabela 5 - Potência mínima a ser gerada por cada nó de alocação

Nó	Pm [W]
2	74,5245
4	91,5249
7	84,6008
10	91,7421
13	77,1053
16	85,8826
19	90,4613

Fonte: Do próprio autor.

Na Figura 19 é ilustrado o diagrama unifilar para o sistema isolado para iluminação pública com os painéis alocados pelo algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B) nos nós 2, 4, 7, 10, 13, 16 e 19, que gerarão a energia para o circuito caso nas noites, segundo Tabela 5.

Figura 19 - Diagrama unifilar do circuito em corrente contínua para tensão de 12 Vcc



Fonte: Do próprio autor.

A Equação (14) estabelece a corrente a ser injetada no nó de geração I_{inj} [A], que é a relação entre a potência mínima que deve ser gerada por nó, da Tabela 6, e a tensão nominal igual a 12 Vcc.

$$I_{inj} = \frac{P_m [W]}{v_n [V]} [A] \quad (14)$$

As correntes injetadas I_{inj} [A] em cada nó com os valores de geração da Tabela 5 e segundo a Equação (14) são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Correntes injetadas por nó de geração para 12 Vcc

Nó	P_m [W]	I_{inj} [A]
2	74,5245	6,2104
4	91,5249	7,6271
7	84,6008	7,0501
10	91,7421	7,6452
13	77,1053	6,4254
16	85,8826	7,1569
19	90,4613	7,5384

Fonte: Do próprio autor.

Para o dimensionamento dos painéis, deve-se conhecer os níveis de radiação solar local. A partir de mapas solarimétricos, é possível conhecer os valores de radiação para três ângulos diferentes de instalação dos painéis solares; para o plano horizontal, para o ângulo no qual se obtém a maior medida diária de incidência solar e para o ângulo que fornece o valor mínimo mensal.

Na Tabela 7, segundo dados do CEPEL (2013), a radiação média anual é igual a 5,01 kWh/m², com uma incidência diária mínima de 3,72 kWh/m² no mês de junho na cidade de Três Lagoas (MS), cidade mais próxima da Ilha Solteira (SP), com base nos dados de radiação solar diária na base de dados da SUENB-SUNDATA e que serão tidos em conta para a seguinte análise.

É importante salientar que, para efeitos de projetos solares fotovoltaicos, sempre se leva em conta o valor mínimo de radiação, para garantir um funcionamento normal do sistema em todas as épocas do ano (CEPEL, 2013).

Tabela 7 - Radiação média mensal [kWh/m²] de Três Lagoas (MS)

Mês	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dec	Média
Radiação	5,61	5,89	5,56	4,56	4,08	3,72	4,39	4,56	4,72	5,72	5,72	5,58	5,01

Fonte: (CRESESB/SUNDATA, 2013)

Em geral o valor da latitude local é usado como ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, mas o ângulo com a maior média diária anual de irradiação solar costuma ser usado quando se deseja a maior geração anual de energia, o que seria o caso de aplicações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição dentro do Sistema de Compensação de Energia, definido pela Resolução Normativa da Aneel nº 482/12.

O ângulo com menor valor mensal de irradiação solar é uma medida conservadora, usado em situações onde o fornecimento contínuo de energia elétrica é crítico para atividade fim e, por isso, procura-se minimizar o risco de falta de energia (CEPEL, 2013).

Na Tabela 9, observam-se os valores de radiação para o plano inclinado de 20° em relação à horizontal e apontado em direção ao norte geográfico, que é, segundo o banco de dados (CEPEL, 2013), a condição que maximiza a média do mês com menor insolação. Para o mês de junho esse valor é de 4,66 kWh/m² de cor vermelha. Assim, o sistema de iluminação público isolado autônomo será considerado para tal valor de radiação incidente.

Tabela 8 - Irradiação solar diária média mensal [kWh/m². dia] de Três Lagoas (MS)

Ângulo	Inclinação	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano horizontal	0° N	5,61	5,89	5,56	4,56	4,08	3,72	4,39	4,56	4,72	5,72	5,72	5,58	5,01
Ângulo igual à altitude	21° N	5,1	5,61	5,69	5,08	4,94	4,69	5,53	5,28	4,97	5,57	5,25	5,01	5,23
Maior méd anual	20° N	5,13	5,64	5,7	5,06	4,91	4,66	5,49	5,26	4,97	5,59	5,29	5,04	5,23
Maior mín mensal	25° N	4,95	5,5	5,85	5,12	5,05	4,82	5,69	5,36	4,96	5,48	5,11	4,85	5,21

Fonte: (CRESESB/SUNDATA, 2013)

O cálculo da capacidade mínima de geração dos módulos fotovoltaicos é determinado por meio da energia solar acumulada durante o dia, onde será instalado o sistema. Uma forma conveniente de se expressar o valor acumulado é através do número de horas do Sol Pleno (SP) (CEPEL – CRESESB, 2004).

O valor de horas em Sol Pleno, SP, reflete o número de horas em que a radiação solar deve ser constante e igual ao padrão (1000 W/m²), de forma que a energia resultante seja equivalente à energia acumulada durante o dia. Este valor é dado pela Equação (15), onde se leva em conta a radiação de 4,66 kWh/m², dado apresentado na Tabela 8.

$$SP = \frac{\text{Irradiação solar} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]}{1 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]} [h] \quad (15)$$

$$SP = \frac{4,66 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]}{1 \text{kW}/\text{m}^2} = 4,66 h$$

Ou seja, para produzir uma potência incidente e constante sob condições padrão de 1 kW/m², precisa-se de uma radiação de 4,66 kWh/m² durante 4,66 h.

A Energia a ser gerada por dia ($E_{g_{dia}}$) para 12 horas de uso diário do sistema de iluminação pública, com os dados de potências mínimas (P_m) em Watts a ser geradas nos nós de geração apresentadas na Tabela 5 é calculada com a Equação (16). Apresentam-se na Tabela 9 os valores de energia diários.

$$E_{g_{dia}} = P_m[W] * h_{dia}[h] \quad [Wh] \quad (16)$$

Sendo:

$E_{g_{dia}}$ = Energia a ser gerada por dia

P_m = Potência a ser gerada

h_{dia} = Tempo que o sistema está em funcionamento = 12 horas

Tabela 9 – Energia diária consumida pelo sistema autônomo de iluminação a 12 Vcc

Nó	Potência Gerada [W]	Eg_{dia} [Wh]
2	74,5245	894,2934
4	91,5249	1098,2983
7	84,6008	1015,2099
10	91,7421	1100,9053
13	77,1053	925,2638
16	85,8826	1030,5915
19	90,4613	1085,5353

Fonte: Do próprio autor.

A partir da Equação (16), e para uma taxa diária de 4,66 kWh/m² e $SP=4,66$ h, para condições padrão de operação, obtém-se a Equação (17) que serve para calcular a potência mínima corrigida (P_{mcp}) em [W]. Segundo o nó gerador, estes dados de potência mínima corrigida são apresentados na Tabela 10.

$$P_{mcp} = \frac{Eg_{dia}[Wh]}{SP[h]} \quad [W] \quad (17)$$

Tabela 10 - Potência mínima do gerador fotovoltaico baixo condições padrão STC

Nó	Eg_{dia}	P_{mcp} [W]
2	894,2934	191,9085
4	1098,2983	235,6863
7	1015,2099	217,8562
10	1100,9053	236,2458
13	925,2638	198,5545
16	1030,5915	221,1570
19	1085,5353	232,9475

Fonte: Do próprio autor.

Considerando-se uma eficiência da fiação = 0,98 e uma eficiência do banco de baterias de 0,95 segundo Seguel (2009). Por exemplo, para a potencia mínima corrigida baixo condições padrão STC (P_{mcp}) do nó dois de 191,9085 vezes 0,98 e 0,95 a potência mínima corrigida (P_{MC}) a ser gerada por o nó dois vai ser 206,1315 W, a mesma análise e feita para os demais nós geradores. Por tanto da Tabela 10 as potências mínima corrigidas para condições padrão são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Potências mínimas corrigidas baixo condições padrão STC considerando as perdas de fiação e das baterias.

Nó	P_{mcp} [W]	P_{MC} [W]
2	191,9085	206,1315361
4	235,6863	253,15396
7	217,8562	234,00237
10	236,2458	253,75485
13	198,5545	213,27011
16	221,1570	237,54777
19	232,9475	250,21213

Fonte: Do próprio autor.

A Resolução Normativa nº 83 ANEEL de 20 de Setembro de 2004, sistemas de baixo consumo, devem ter uma autonomia de dois dias e, ao voltar a uma condição mínima de descarga, deve ter sua energia restaurada em três dias normais de sol. Assim, a potência mínima corrigida para dois dias de autonomia (P_{Aut2}) é calculada através da Equação (18).

$$P_{Aut2} = P_{MC}[W] * \left(1 + \frac{2}{3}\right) \quad [W] \quad (18)$$

Os resultados para uma autonomia de dois dias (P_{Aut2}), para cada nó de geração, são apresentados na Tabela 12. Estes valores representam a potência mínima corrigida baixo condições padrão STC que os módulos fotovoltaicos devem gerar.

Tabela 12 - Potência mínima para cada nó de geração para uma autonomia de dois dias

Nó	P_{MC} [W]	P_{Aut2} [W]
2	206,13154	343,5388
4	253,15396	421,9064
7	234,00237	389,9884
10	253,75485	422,9078
13	213,27011	355,4360
16	237,54777	395,8971
19	250,21213	417,0035

Fonte: Do próprio autor.

Para a escolha dos painéis solares levam-se em conta os valores de potência para uma autonomia de dois dias, apresentados na Tabela 12 e de corrente da Tabela 6.

O mercado oferece uma grande quantidade de fabricantes e fornecedores que facilitam a obtenção dos módulos solares com valores diferentes de potências. Para este projeto foi adotado o painel solar Kyocera KD 145 W SX 7,63 A e 17,7 Vac, (ver Anexo 1), com o valor de corrente máxima, segundo o fabricante, de 7,63 A é usada para o dimensionamento do controlador de carga.

Para o dimensionamento do banco de baterias é importante ter em conta a profundidade de descarga⁸, relacionada com a vida útil da bateria e a autonomia, que corresponde a número de dias que a bateria vai satisfazer a demanda o sistema sem nenhuma reposição de energia, o cálculo é o seguinte:

Com os valores de energia diária consumida pelo sistema autônomo de iluminação ($E_{g_{dia}}$) em Wh da Tabela 9 e de correntes injetadas (I_{inj}) em Ampere da Tabela 6 em cada

⁸ Profundidade de descarga: Refere-se à quantidade de carga retirada da bateria num ciclo típico de funcionamento, expressa em percentagem da capacidade nominal desta.

um dos nós com geração, vezes o número de horas que o sistema de iluminação estará em funcionamento para assim obter a corrente diária (I_{dia}) em Ampere com a Equação (18).

$$I_{dia} = I[A] * 12[h] \quad [Ah] \quad (18)$$

Segundo CEPEL – CRESESB, (2004), são usadas para determinar o valor da corrente diária corrigida ($I_{diáriacorr}$) em Ampere uma a porcentagem de eficiência de 0,98 para as baterias e de 0,95 de fiação para cada banco de baterias segundo Equação (19).

$$I_{diáriacorr} = \frac{I_{diária}[A]}{0,98*0,95} \quad [A] \quad (19)$$

Os valores de corrente diária (I_{dia}) e de corrente diária corrigida ($I_{diáriacorr}$), os dois em Ampere são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Corrente diária e corrente diária corrigida para cada nó de geração em Ampere

Nó	Eg_{dia} [Wh]	I_{dia} [A]	$I_{diáriacorr}$ [A]
2	894,2934	74,5245	80,0477
4	1098,2983	91,5249	98,3081
7	1015,2099	84,6008	90,8709
10	1100,9053	91,7421	98,5415
13	925,2638	77,1053	82,8199
16	1030,5915	85,8826	92,2477
19	1085,5353	90,4613	97,1657

Fonte: Do próprio autor.

Para o consumo do banco de baterias em condições normais de temperatura (25 °C) e profundidade de descarga do 30% para prolongar sua vida útil, segundo o fabricante (FREEDOM, 2013). Para uma autonomia de dois dias a corrente na bateria (I_{Bat}) em

Ampere, é calculada mediante a Equação (20). Os dados de corrente na bateria são apresentados na Tabela 14.

$$I_{Bat} = 1,66 * I_{diariacorr} * Autonomia \quad [A] \quad (20)$$

A constante 1,66 é o fator de correção de bateria de acumuladores, que leva em conta a profundidade de descarga admitida, o envelhecimento e um fator de temperatura (SOLARTERRA, 2011), portanto e segundo os dados da Tabela 13 de corrente diária corrigida ($I_{diariacorr}$), e da Equação (20) a corrente projetada na bateria para uma autonomia de dois dias em [A] é apresentado na Tabela 14.

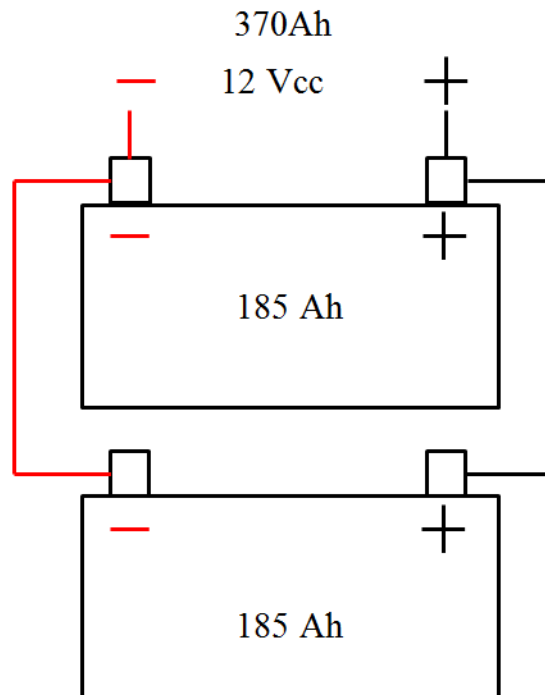
Tabela 14 – Corrente no banco de baterias para uma autonomia de dois dias

Nó	$I_{diariacorr}$ [A]	I_{Bat} [A]
2	80,04775	265,7585
4	98,30812	326,3830
7	90,87092	301,6915
10	98,54147	327,1577
13	82,81989	274,9620
16	92,24772	306,2624
19	97,16571	322,5902

Fonte: Do próprio autor.

Portanto, pelos dados de corrente da bateria para uma autonomia de dois dias obtidos na Tabela 14, escolheram-se baterias estacionárias da marca FREEDOM DF3000 185 Ah, ligadas em paralelo, para obter uma saída duas vezes a capacidade das baterias individuais, mantendo a tensão nominal igual, por exemplo, para o nó de maior capacidade, o nó 10, precisa-se de 327,1557 Ah, e tem-se duas baterias de 185 Ah 12 Vcc, com isto tem-se uma tensão de saída de 12 Vcc e uma capacidade total de 370 Ah, assim como se apresenta na Figura 20.

Figura 20 – Conexão em paralelo das baterias FREEDOM DF 3000 de 12 Vcc



Fonte: Do próprio autor.

Finalmente o dimensionamento do controlador de carga baseia-se principalmente na corrente máxima fornecida pelos módulos (I_{m_p}), que deve ser corrigida com um fator de segurança de 30% (VILLALVA; GAZOLI, 2013), para garantir que a corrente não será excedida em nenhuma condição. A corrente no controlador de carga (I_{con}) é dada pela Equação (21).

$$I_{con} = I_{m_p}[A] * 1,3 \quad [A] \quad (21)$$

$$I_{con} = 7,63 * 1,3 = 9,92 \text{ A}$$

O que significa que para cada nó de alocação (2, 4, 7, 10, 13, 16, 19), precisa-se de um controlador de carga de 10 A e 12 Vcc, facilmente encontrados no mercado.

As perdas em Watts, também são obtidas a partir da solução ótima de alocação Branch and Bound (B&B). As perdas são calculadas para um cabo de cobre de 4 mm² isolado com uma resistência de 0,0033 Ω/m, porcentagem de regulação de tensão do 3% (dado de entrada do algoritmo) para condições normais de operação (NBR 5101, 2012).

Os valores das perdas são apresentados na Tabela 15 linha por linha, com um total de 4,1121 W para os 20 nós.

Tabela 15 - Perdas no circuito caso para 12 Vcc obtidas através do algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B)

Linha		Perdas [W]
1	2	0,377205
2	3	0,092894
3	4	0,092894
4	5	0,353357
5	6	0,002341
6	7	0,330972
7	8	0,327806
8	9	0,003141
9	10	0,344233
10	11	0,336245
4	12	0,082359
12	13	0,085016
13	14	0,31707
14	15	0,001996
15	16	0,296471
16	17	0,319204
17	18	0,000626
18	19	0,330419
19	20	0,417933
TOTAL		4,112182

Fonte: Do próprio autor.

Na Tabela 16, apresentam-se os custos dos componentes do circuito caso de iluminação pública autônoma necessários para seu funcionamento normal para tensão de 12 Vcc.

Tabela 16 - Custo circuito caso com tensão de 12 Vcc

ITEM	Quantidade	Custo unitario R\$	Custo total R\$
Painel solar	14	\$ 1.549,00	\$ 21.686,00
Soporte painel solar	14	\$ 1.199,00	\$ 16.786,00
Baterias DF 3000	14	\$ 869,00	\$ 12.166,00
Luminaria 30 Watts	20	\$ 795,00	\$ 15.900,00
Aterramento completo	3	\$ 189,86	\$ 569,58
Postes	20	\$ 291,16	\$ 5.823,20
Controle	20	\$ 55,00	\$ 1.100,00
Gabinete	7	\$ 518,00	\$ 3.626,00
Cabo 2X4 Preto 750V	671	\$ 4,68	\$ 3.140,28
Controlador de carga	7	\$ 709,00	\$ 4.963,00
TOTAL		R\$	85.760,06

Fonte: Do próprio autor.

4.2.2.1 Custo do kWh para a conexão a 12 Vcc

O custo do kWh, é dado pelo índice de depreciação acumulativa anual (D_{A25}), onde se tem em conta o custo de investimento inicial para um horizonte de 25 anos, tempo de vida útil do sistema, porcentagem de manutenção também de 10% e valor residual (V_R) de R\$ 1.000,00 (um mil reais). Portanto, para o sistema autônomo, que não tem valor agregado de impostos de ICMS e PIS/COFINS, usam-se as Equações (22) e (23) para obter o valor do kWh.

$$D_{A25} = \frac{C_{H25} - V_R}{V_u} \quad (22)$$

$$C_{H25} = P_S + C_M \quad (23)$$

Sendo:

D_{A25} = Depreciação acumulativa para um horizonte de 25 anos

C_{H25} = Custo histórico do sistema para sua vida útil

V_R = Valor esperado residual do sistema depois de sua vida útil

V_U = Vida útil de 25 anos

P_S = Preço do sistema

C_M = Custo de manutenção do sistema durante seu horizonte de vida útil.

Para o custo histórico (C_{H25}) e segundo os valores da Tabela 16, que são iguais aos apresentados na Tabela 17, para os elementos mais importantes e de maior custo em reais (R\$) do sistema, tendo-se em conta o número de vezes a serem trocados para o horizonte de 25 anos, por exemplo as baterias tem uma vida útil de 2,5 anos, para um horizonte de 25 anos, vai ser necessária a troca 10 vezes, de igual forma para os outros componentes.

Tabela 17 - Custo histórico para um horizonte de 25 anos do sistema com tensão de 12 Vcc

Item	Custo em R\$	Horizonte 25 anos	Custo para Horizonte de 25 Anos em R\$
Painel	21.686,00	1	21.686,00
Bateria	12.166,00	10	121.660,00
Luminárias	15.900,00	2	31.800,00
Controlador de carga	4.963,00	5	24.815,00
TOTAL			199.961,00

Fonte: Do próprio autor.

$$Depreciação\ Acumulativa_{25} = \frac{(199.961 + 1,10 * 199.961) - 1.000}{25} = 16.756,72$$

O valor da depreciação acumulativa anual obtida de quase R\$ 16.756 (dezesseis mil setecentos e cinquenta e sete reais) vai ser o custo do *kWh/ano*, ou seja, para determinar o custo do kWh é só dividir este valor pelo número de horas que o sistema vai estar em

funcionamento durante o ano, ou seja, 4.380 horas. Portanto o valor do *kWh* vai ser R\$ 3,89 (três reais e nove centavos)

Outra forma de calcular o custo da energia para o sistema isolado é levar em conta a radiação solar diária e o valor de pleno sol, ou seja, 4,66 h (SHAYANI, 2006).

Para o sistema composto por 14 painéis solares de 140 *Wp*, que gera uma *Wp* de 1,960 *kWp*, com uma isolação media anual de 4,66 kWh/m², com aproveitamento dos painéis experimental segundo Shayany (2006) de 50%, é gerado por dia:

$$Eg_{dia}[KW] = Pg_p[kW] * SP[h] * Ef_p \quad (24)$$

Sendo:

Eg_{dia} = Energia gerada pelo arranjo fotovoltaico

Pg_p = Potência gerada pelo arranjo fotovoltaico

SP = Sol Pleno

Ef_p = Aproveitamento médio dos painéis

$$Pg_{dia} = 1,960 \text{ kWp} * 4,66h * 0,5 = 4,566 \text{ kWh}$$

Para uma vida útil de 25 anos, o arranjo fotovoltaico vai gerar 114,15 *MWh*

Portanto, o custo do *kWh* pela potência gerada vai ser a relação entre o custo do sistema em 25 anos (C_{VU}), pela energia que eles vão gerar neste mesmo tempo (Eg_{VU}), esta relação esta dada pela Equação (23).

$$\frac{C_{VU} [R\$]}{Eg_{VU} [MWh]} \quad (25)$$

Assim, o custo do kWh vai ser:

$$\frac{199.961,00 \text{ R\$}}{114,15 \text{ MWh}} = 1.751,739 \text{ [R\$/MWh]}$$

Fazendo a respetiva conversão de *MWh* a *kWh*, o custo do *kWh* é 1,75 R\$ (um real e setenta e cinco centavos).

Ou seja, uma diferença de R\$ 2,14 (dois reais e quatorze centavos) no custo do *kWh*, considerando os cálculos obtidos segundo valores da vida útil do sistema e potência gerada. O segundo método não é tido em conta por efeitos de comparativos de custo do *kWh*, além a conexão em corrente alternada não tem geração de energia.

4.2.3 Dimensionamento para 24 Vcc

Para o dimensionamento em 24 Vcc, usa-se os mesmos dados de entrada do algoritmo de optimização clássica a exceção da tensão de entrada e procedimento que foi utilizado para 12 Vcc.

Mesmo com valores de correntes menores, usa-se a mesma bitola para os condutores que a utilizada no caso de 12 Vcc, devido à resistência mecânica do cabo, uma vez que é considerada uma rede aérea

Com radiação solar diária de $4,66 \text{ kWh/m}^2$ e $SP = 4.66 \text{ h}$, o algoritmo de optimização clássica Branch and Bound (B&B), aloca quatro geradores nos nós 3, 9, 13 e 18, e as quedas de tensão nos outros nós são apresentadas na Tabela 18, além da potência mínima a ser gerada para atender a demanda do circuito em uma hora.

Pode-se concluir segundo Tabela 18, que para uma tensão de 24 Vcc, o algoritmo de optimização clássica só alocou quatro painéis solares fotovoltaicos, por enquanto a 12 Vcc o algoritmo alocou sete, podendo concluir que a maior tensão menor é o numero de painéis solares fotovoltaicos a serem alocados para satisfazer a demanda do sistema autónomo de iluminação.

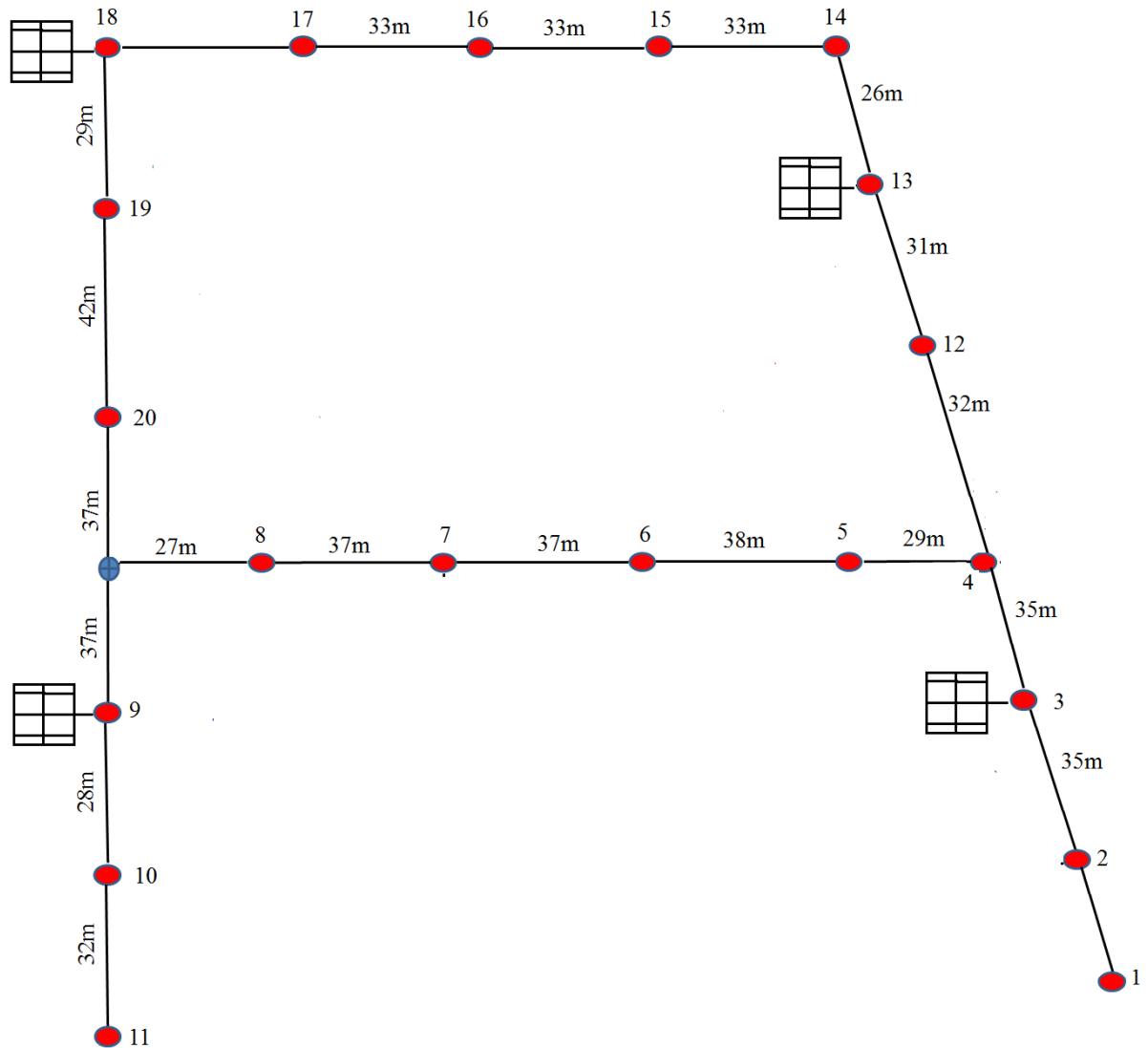
Tabela 18 – Tensão nos nós de alocação e potência a ser gerada

Nó	Tensão	Alocação	P_m [W]
1	23,7740	0	0
2	23,8507	0	0,0000
3	24,0000	1	151,9805
4	23,8434	0	0,0000
5	23,7339	0	0,0000
6	23,6714	0	0,0000
7	23,6889	0	0,0000
8	23,7849	0	0,0000
9	24,0000	1	155,5685
10	23,8804	0	0,0000
11	23,8121	0	0,0000
12	23,8892	0	0,0000
13	24,0000	1	143,1586
14	23,8821	0	0,0000
15	23,8030	0	0,0000
16	23,7942	0	0,0000
17	23,8558	0	0,0000
18	24,0000	1	145,4562
19	23,8762	0	0,0000
20	23,7909	0	0,0000

Fonte: Do próprio autor.

O diagrama unifilar para o circuito de 24 Vcc, com os painéis solares alocados no sistema caso obtidos a partir do PQIM formulado, é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama unifilar circuito caso de 24 Vcc



Fonte: Do próprio autor.

Desta forma, e segundo os dados apresentados na Tabela 18 de potência mínima gerada (P_M) para uma hora, obtém-se a energia necessária para 12 horas de uso ($E_{g_{dia}}$) em Wh. Segundo a Equação (16), a Tabela 19 apresenta os valores de energia para um dia.

Tabela 19 - Energia diária consumida pelo sistema autônomo de iluminação a 24 Vcc

Nó	P_m [W]	$E_{g_{dia}}$ [Wh]
3	151,9805	1823,7664
9	155,5685	1866,8224
13	143,1586	1717,9026
18	145,4562	1745,4744

Fonte: Do próprio autor.

Segundo o Centro de referência para Energia Solar e Eólica (2013), o dado de insolação é $4,66 \text{ kWh/m}^2$, a potência mínima baixo condições padrão STC (P_{mcp}) em W a ser gerada em cada nó é calculada pela Equação (17), e é apresentada na Tabela 20:

Tabela 20 - Potência mínima do gerador fotovoltaico baixo condições padrão STC

Nó	$E_{g_{dia}}$ [Wh]	P_{mcp} [W]
3	1823,7664	391,3662
9	1866,8224	400,6057
13	1717,9026	368,6486
18	1745,4744	374,5653

Fonte: Do próprio autor.

Para obter a potência mínima corrigida (P_{MC}), têm-se em conta os dados de potência mínima corrigida baixo condições padrão (P_{mcp}) da Tabela 20, assim como as porcentagens da eficiência da fiação = 0,98 e uma eficiência do banco de baterias de 0,95 (SEGUEL 2009).

Os valores de potência mínima corrigida (P_{MC}) em Watts, para cada nó de geração são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Potências mínimas corrigidas baixo condições padrão STC considerando as perdas de fiação e das baterias.

Nó	P_{mcp} [W]	P_{MC} [W]
3	391,3662	403,7251
9	400,6057	413,2564
13	368,6486	380,2902
18	374,5653	386,3937

Fonte: Do próprio autor.

A potência para dois dias de autonomia (P_{Aut2}) em W, segundo a Equação (18) e a potência mínima corrigida (P_{MC}) da Tabela 21. A potência para uma autonomia de dois dias que deve ser gerada nos quatro nós de alocação são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Potência mínima para cada nó de geração para uma autonomia de dois dias

Nó	P_{MC} [W]	P_{Aut2} [W]
3	403,7251	670,1837
9	413,2564	686,0056
13	380,2902	631,2817
18	386,3937	641,4136

Fonte: Do próprio autor.

A partir destes dados da P_{Aut2} da Tabela 22, podem-se escolher módulos solares Kyocera KD240GX – LFB poli cristalino com, $V_{mp} = 29.8$ V e $I_{mp} = 8,06$ A, ligados em série para fornecer uma tensão de 24 Vcc (ver Anexo2).

Para o dimensionamento do banco de baterias calculam-se a corrente a ser injetada no nó de geração I_{inj} [A], por meio da Equação (14) e com os dados de potência a ser gerada da Tabela (19), obtém-se a Tabela 23.

Tabela 23 - Corrente do sistema para 24 Vcc

Nó	Pm [W]	I_{inj} [A]
3	151,9805	6,3325
9	155,5685	6,4820
13	143,1586	5,9649
18	145,4562	6,0607

Fonte: Do próprio autor.

Segundo os valores de corrente da Tabela 23, obtém-se o valor de corrente diária (I_{dia}) em Ah, multiplicado os valores de corrente desta tabela pelo número de horas de uso diário (12 horas).

O valor de corrente diária corrigida, usando a Equação (19), usando os mesmos dados de eficiência de fiação e de eficiência das baterias, de 0,95 e 0,98 respectivamente.

Os valores de corrente diária (I_{dia}) e de corrente diária corrigida ($I_{diáriacorr}$), são apresentados na Tabela 25.

Tabela 24 - Corrente diária e corrente diária corrigida para 24 Vcc

Nó	I_{inj} [A]	I_{dia} [Ah]	$I_{diáriacorr}$ [Ah]
3	6,3325	75,9903	81,6222
9	6,4820	77,7843	83,5492
13	5,9649	71,5793	76,8843
18	6,0607	72,7281	78,1183

Fonte: Do próprio autor.

Têm-se as mesmas condições de temperatura e profundidade de descarga que no circuito de 12 Vcc, ou seja, temperatura (25 °C) e profundidade de descarga de 30 %. Os dados de corrente diária corrigida ($I_{diáriacorr}$) da Tabela 24 para uma autonomia de dois dias

são usados para calcular os valores da corrente na bateria (I_{Bat}) e usando a Equação (20) para determinar I_{Bat} em Ah nos nós de alocação são apresentados na Tabela 25

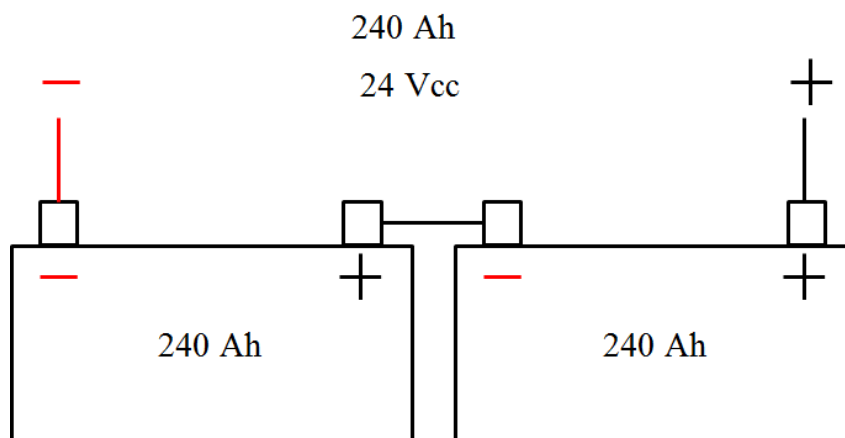
Tabela 25 - Banco de baterias para uma autonomia de 2 dias

Nó	$I_{diária\ corr}$ [Ah]	I_{Bat} [Ah]
3	81,6222	270,9857
9	83,5492	277,3832
13	76,8843	255,2559
18	78,1183	259,3526

Fonte: Do próprio autor.

Portanto, para os dados da corrente da bateria (I_{Bat}) para uma autonomia de dois dias, apresentados na Tabela 25, escolhem-se baterias estacionárias marca FREEDOM DF4000 240 Ah e tensão nominal de 12 V. É necessário conectar duas baterias em série para fornecer a tensão de 24 V, como apresenta a Figura 22:

Figura 22- Conexão série do banco de baterias para garantir a tensão de 24 Vcc



Fonte: Do próprio autor.

O controlador de carga é dimensionado mediante Equação (19), com o valor decorrente máxima dos painéis (I_{m_p}) dos painéis, que para este caso é de 8,06 A.

$$I_{con} = 8,06 * 1,3 = 10,478 A$$

Assim, para cada nó com alocação de gerador fotovoltaico, se precisa de um controlador de carga de 10 A e 24 V, também facilmente encontrados no mercado.

As perdas em Watts, com tensão de 24 Vcc e cabo de cobre de 4 mm² isolado com uma resistência de 0,0033 Ω /m, são apresentadas na Tabela 27 e também são obtidas mediando o algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B).

Tabela 26 - Perdas circuito em 24 Vcc

Linha		Perdas [W]
1	2	0,094936
2	3	0,370389
3	4	0,407600
4	5	0,240013
5	6	0,059915
6	7	0,004828
7	8	0,144960
8	9	0,590997
9	10	0,297156
10	11	0,084659
4	12	0,038224
12	13	0,230148
13	14	0,311056
14	15	0,110219
15	16	0,001342
16	17	0,066884
17	18	0,335585
18	19	0,307440
19	20	0,105635
TOTAL		3,8002

Fonte: Do próprio autor.

Os custos de investimento inicial para todo o sistema de iluminação a tensão de 24 Vcc são apresentados na Tabela 27

Tabela 27 - Custo do investimento inicial do sistema fotovoltaico para 24 Vcc

ITEM	Unidade	Quantidade	Custo unitario R\$	Custo total R\$
Painel solar	und	8	\$ 1.549,00	\$ 12.392,00
Soporte painel solar	und	8	\$ 1.199,00	\$ 9.592,00
Bateria F4001	und	8	\$ 899,00	\$ 7.192,00
Luminaria 30 Watts	und	20	\$ 795,00	\$ 15.900,00
Aterramento completo	und	3	\$ 189,86	\$ 569,58
Postes	und	20	\$ 291,16	\$ 5.823,20
Controle	und	20	\$ 55,00	\$ 1.100,00
Gabinete	und	4	\$ 518,00	\$ 2.072,00
Cabo 2X4 Preto 750V	m	671	\$ 4,68	\$ 3.140,28
Controlador de carga	und	4	\$ 709,00	\$ 2.836,00
TOTAL				\$ 60.617,06

Fonte: Do próprio autor.

4.2.3.1 Custo do kWh para a conexão a 24 Vcc

Para determinar o custo do kWh primeiro determina-se o custo do sistema para sua vida útil, assim como se apresenta na Tabela 28

Tabela 28 - Custo do sistema para um horizonte de 25 anos

Item	Custo em R\$	Horizonte 25 anos	Custo para Horizonte de 25 Anos
Painel solar	\$ 12.392,00	1	\$ 12.392,00
Bateria	\$ 7.192,00	10	\$ 71.920,00
Luminárias	\$ 15.900,00	2	\$ 31.800,00
Controlador de carga	\$ 2.836,00	5	\$ 14.180,00
TOTAL			\$ 130.292,00

Fonte: Do próprio autor.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 28 e das Equações (22) e (23), o custo do *kWh* em R\$ é:

$$D_{A25} = \frac{(130.292 + 1,10 \cdot 130.292) - 1.000}{25} = 10.904,28$$

O custo do *kWh/ano* é de R\$ 10.904,28 (dez mil novecentos reais), para determinar o valor do *kWh*, é só dividir este valor pelo número de horas que o sistema vai estar ligado, ou seja, 4380 horas, por tanto, o valor do *kWh* é de R\$ 2,49 (dois reais e quarenta e nove centavos).

De igual forma, o custo do *kWh* segundo a potência gerada pelo sistema, para uma potência pico instalada de 1,920 *kWp*, com uma insolação média anual de 4,66 *kWh/m²*, e aproveitamento dos painéis, segundo o fabricante de 80% gera por dia:

$$E_{g\text{dia}} = 1,920 \text{ kWp} * 4,66\text{h} * 0,8 = 7,1577 \text{ kWh}$$

E para uma vida útil de 25 anos gera 65.314 *MWh*, portanto, o custo do sistema fotovoltaico para sua vida útil da Tabela (30), fica:

$$kWh[R\$] = \frac{R\$ 130.292,00}{65,3145 \text{ MWh}} = 1.994,8556 \text{ R\$/MWh}$$

Portanto, o custo do *kWh*, segundo a potência gerada, é R\$ 1,99 (um real e noventa e nove centavos), ou seja, uma diferença de R\$ 0,49 (quarenta e nove centavos) do *kWh*, calculado a partir da vida útil e a potência gerada.

4.3 COMPARATIVO ENTRE O CIRCUITO CASO EM CORRENTE ALTERNADA E CORRENTE CONTÍNUA EM 12VCC E 24 VCC

Para os três casos de tensão analisados, para a alimentação de um sistema de iluminação pública, ou seja, o circuito em corrente alternada com tensão de 220 *Vca* e os circuitos alimentados em corrente contínua, para 12 *Vcc* e 24 *Vcc*, é feita, a seguir, uma análise comparativa de consumo mensal, de custo e investimento inicial, das características

técnicas, da vida útil e taxa de retorno do investimento para 25 anos, além do comparativo entre as vantagens ambientais de cada uma das tecnologias.

4.3.1 Consumo

O consumo das duas tecnologias é definido pela potência de suas luminárias e pelo número de horas em média que estarão acessas (12 horas). Para o custo anual são considerados os valores do *kWh* para um horizonte de 25 anos. Para o circuito em corrente alternada, não haverá geração de energia distribuída. Assim, os custos considerados são, respectivamente, de R\$ 1,0448 em corrente alternada, de R\$ 1,99 para 12 Vcc e R\$ 1,29 para 24 Vcc. Estes valores de consumo estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Consumo de energia das duas tecnologias

Tecnologia	Consumo real [W]	Carga instalada real Q [kW]	Consumo mensal real C [kWh]
VSAP 70W	86	20,64	277,402
LED	31	7,44	99,994
		Diferença	177,408

Fonte: Do próprio autor.

Na Tabela 29, observa-se uma economia no consumo de energia de 177,4080 *kWh* por cada mês, do LED de 30 W em comparação com a IP tradicional com VSAP de 70 W.

Esta redução no consumo de energia gera uma economia anual de R\$2.224,00 (dois mil duzentos e vinte quatro reais), para as duas conexões em corrente contínua. Este valor é significativo para o circuito de só 20 pontos de iluminação. O custo comparativo, mensal e anual, entre as três conexões propostas, é apresentado na Tabela 30.

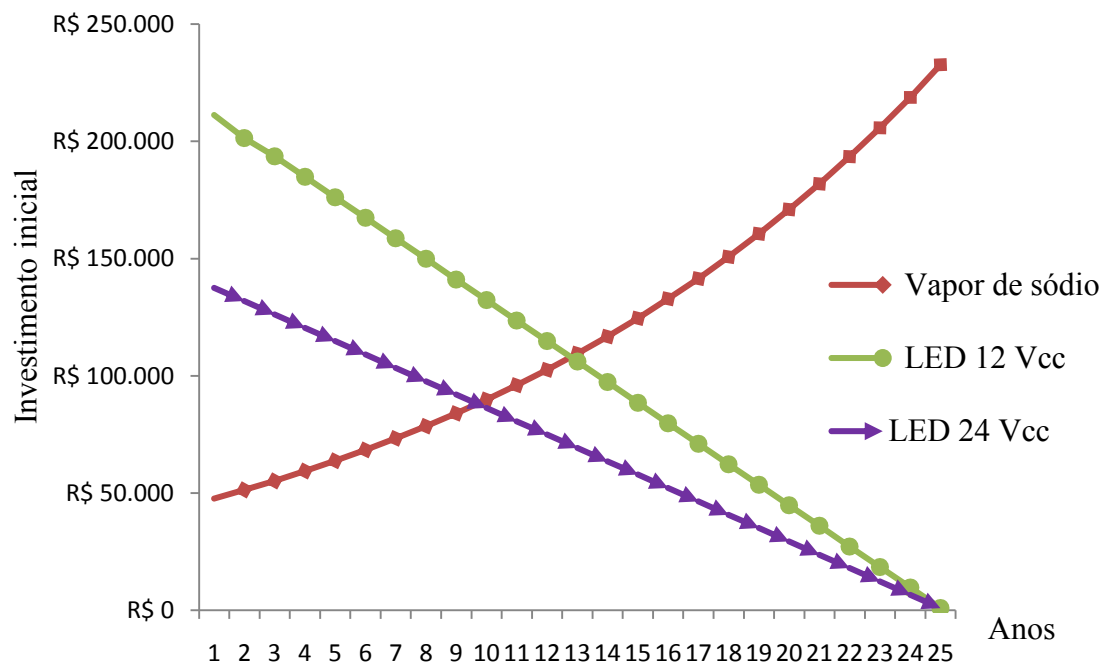
Tabela 30 - Custo de consumo mensal e anual das conexões apresentadas

Tecnologia	Consumo mensal R\$	Consumo anual R\$
VSAP 70W	\$ 289,83	\$ 3.477,95
Led 12 VCC	\$ 198,99	\$ 2.387,85
Led 24 VCC	\$ 128,99	\$ 1.547,90

Fonte: Do próprio autor.

Na Figura 23, observa-se a relação entre o custo do investimento inicial dos sistemas em corrente alternada e corrente contínua para 12 Vcc e 24 Vcc e sua vida útil

Figura 23 - Relação investimento inicial e vida útil em anos



Fonte: Do próprio autor.

O investimento inicial em corrente contínua é recuperado a partir do ano 9. Este tempo poderá ser reduzido se as expectativas de redução de custos dos sistemas fotovoltaicos se

concretizarem. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE)⁹, em apenas 5 anos, o custo do MWh em geração solar, caiu cerca de 50%, devido a popularização e aproveitamento do recurso solar em nível mundial. Isto torna a proposta da utilização de circuitos em corrente contínua bastante promissora. Isto torna a possibilidade de sistemas de iluminação pública autônomos, em corrente contínua, uma opção viável.

Estudos e as novas regulamentações para o setor elétrico poderão popularizar e aumentar a demanda para projetos inovadores. Adicionalmente, programas de incentivos como o Programa de Iluminação Pública Eficiente (RELUZ), que oferece financiamento destinado à elaboração de projetos e implementação de programas de substituição da iluminação pública, poderão estimular o investimento em projetos mais eficientes, a partir de novas tecnologias.

4.3.2 Ambientais

Embora as lâmpadas de vapor de sódio causem menor impacto ambiental comparada com as lâmpadas normalmente usada em iluminação pública, também é certo, que comparada com a tecnologia LED, as desvantagens são evidentes, por exemplo:

- a) Ausência de emissão de raios ultravioletas, evitando atração de insetos à luminária, degradando as características originais dela;
- b) Por ser um sistema autônomo isolado a redução no uso do recurso hídrico é considerável;
- c) Não precisa de vapores nem gases contaminantes difíceis de reciclar, considerando a vida útil, ao contrário do LED que é reciclável;
- d) 80% dos materiais que compõem o painel solar podem ser reciclados (Silício, vidro e cablagem) power clouds (2013);
- e) Sua longa vida implica uma menor necessidade de matéria prima para as lâmpadas de substituição.

⁹ Empresa de Pesquisa Energética – EPE: tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

4.4 CONCLUSÃO

Este capítulo fez uma breve descrição da importância da geração fotovoltaica com seus principais componentes e como ela pode ser executada na iluminação pública urbana, como alternativa micro geração distribuída e assim aproveitar de todas suas vantagens em comparação com a geração centralizada e com o uso de lâmpadas de tecnologia LED com VSAP.

Pode-se concluir com os dados obtidos neste capítulo, segundo a vida útil do sistema, o custo do *kWh* para 12 Vcc de R\$ 1,99 (um real e noventa e nove centavos) e de R\$ 1,29 (um real e vinte e nove reais), para 24 Vcc, ou seja, uma diferença de R\$ 0,70 (setenta centavos), a favor da segunda tensão, escolhida para este sistema, valores que foram comparados só por efeito deste estudo, com o valor do *kWh* em corrente alternada, com um custo de R\$ 1,04 (um real e quatro centavos).

Quanto ao benefício econômico, o investimento inicial e para um horizonte de 25 anos, as lâmpadas LED a 24 Vcc apresenta uma desvantagem em relação as lâmpadas tradicionais (VSAP), pois seu investimento inicial é 44,5483% maior. Isto equivale a R\$ 36.400,00 (trinta e seis mil quatrocentos reais), segundo os dados obtidos.

Para evitar correntes inversas da bateria e/ou painel solar fotovoltaico, tem que estar próximos um de outro, bem como, o controlador de carga estar entre os dois. Além do que, para evitar duplos aterramentos no circuito proposto e custos adicionais, os bancos de baterias também são alocados nos nós de geração determinados pelo algoritmo. Em quanto as perdas por efeito Joule, para as duas conexões, são mínimas pelo baixo valor das correntes.

A geração de energia elétrica adjacente ao local de consumo, também chamada geração distribuída, traz vantagens sobre a geração centralizada tradicional, como sua transmissão, redução das perdas nas redes e melhoria da qualidade do serviço de energia elétrica. Dado o impacto da iluminação pública no sistema elétrico brasileiro, este setor também deve ser considerado quando se avalia a alocação de geração distribuída em sistemas de distribuição, particularmente para aquelas relacionadas às fontes renováveis de energia. A redução na taxa de retorno do investimento inicial possibilita que a iluminação pública em corrente contínua seja uma alternativa bastante promissora.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se um projeto de iluminação pública autônomo isolado usando tecnologias LED, considerando as exigências de desenho das distintas normas existentes, que definem os níveis de iluminação no período noturno. Essa análise foi motivada pela necessidade de implementar outras fontes geradores de energia, para aliviar o sistema TUST e TUSD brasileiro, por médio da geração distribuída.

O uso de lâmpadas LED em iluminação pública cada vez mais toma mais força e sua popularização é mais comum devido a todas as vantagens de consumo, manutenção, vida útil e luminotécnicas. As lâmpadas LED são um potencial substituto para a iluminação pública convencional atendendo a todas as exigências da norma NBR 5101 de 2012.

Os resultados apresentados no Capítulo 4, comprovam que a troca de luminária de VSAP de 70 W por luminária LED são eficientes na iluminação pública como mostram os resultados obtidos de tempo de retorno do investimento inicial para um horizonte de 25 anos, tempo de vida útil usado como tempo base para a troca dos materiais para a conexão em corrente alternada como para a conexão em corrente contínua para 12 Vcc e 24 Vcc.

Tendo em visa o problema do tempo de retorno, o sistema com tensão de 24 Vcc, é a melhor opção de conexão devido a que sua taxa de retorno do investimento inicial é no ano nono em comparação com a conexão a 12 Vcc que é no ano décimo segundo. O sistema de iluminação pública autônomo isolado a 24 Vcc, segundo os resultados do algoritmo de otimização clássica Branch and Bound (B&B), só alocou quatro nós de geração para o sistema de 20 nós, reduzindo assim materiais, mas para assegurar a tensão o numero de baterias é maior em comparação à tensão em 12 Vcc.

A tendência do uso de fontes alternativas de energia, que para efeitos desta pesquisa, o custo dos sistemas solares fotovoltaicos teve uma redução considerável nos últimos anos motivo pelo qual o custo do *kWh*, pode ser cada vez mais baixo em comparação com o custo do *kWh* em corrente alternada. Adicionalmente do aproveitamento da energia solar fotovoltaica, está a maior aceitação da tecnologia LED, com um acréscimo de 30 % ao ano, devido a diferentes exigências das normas reguladoras da iluminação pública.

Estudos como o apresentado neste trabalho são importantes no desenvolvimento e modernização das redes de iluminação pública que, a partir de 2014, serão responsabilidade das Prefeituras Municipais, segundo a Resolução ANEEL 410 de 2010. Com isso, é possível considerar os benefícios e vantagens da utilização da tecnologia LED, como vida útil prolongada e segurança devido aos baixos níveis de tensão de operação e, conseqüentemente, redução da manutenção assim como suas características elétricas, luminosas e mecânicas.

Como trabalho futuro, deverão ser avaliados sistemas com maior número de pontos de iluminação, para que seja determinada a validade dos resultados para qualquer escala. E sistemas híbridos que possam ser conectados à rede em datas de geração em tarifa vermelha.

Além da rede de iluminação pública, outras redes em corrente contínua, seja para consumo residencial ou para consumo comercial podem ser avaliadas e ter um maior aproveitamento do recurso solar como fonte inesgotável de energia.

Por fim, deste trabalho originou-se os seguintes artigos:

RAMIREZ, J. A.; FAGUNDES, M. C.; PASCHOARELI JÚNIOR, D. Sistemas autônomos de iluminação pública em loteamentos urbanos em corrente contínua. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 5, 2014, Foz de Iguaçu. *Anais...* Foz de Iguaçu: SBSE, 2014

FAGUNDES, M. C.; RAMIREZ, J. A.; PASCHOARELI JÚNIOR, D. Alocação de geradores solares fotovoltaicos para sistemas autônomos em corrente contínua através da otimização clássica. CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – CBQEE, 10, 2013, Araxá. *Anais...* Araxá: CBQEE, 2013.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 166:** conceitos e definições. Brasília, DF: ANEEL, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 414:** condições gerais de fornecimento de energia elétrica direitos e deveres do consumidor de energia elétrica: da iluminação pública. Brasília, DF: ANEEL, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 414:** da iluminação pública – artigo 24. Brasília, DF: ANEEL, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 456:** da iluminação pública – artigo 2. Brasília, DF: ANEEL, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 482:** capítulo III: do sistema de compensação de energia elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 517:** artigo 5 – inciso IV. Brasília, DF: ANEEL, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 1507.** Brasília, DF: ANEEL, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 1511:** tarifas de aplicação. Brasília, DF: ANEEL, 2010.
- ALTERNATIVAS, SOLARTERRA ENERGIAS. **Energia solar fotovoltaica:** guia prático. São Paulo: Solarterra, 2011. 35 p. Disponível em:
<<http://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/curso-energia-solar-fotovoltaica.pdf>>.
Acesso em: 02 abr. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO – ABILUX. **Primeira fábrica de luzes LED será em São Paulo.** São Paulo, 2013. Disponível em:
<http://www.abilux.com.br/portal/pdf/noticias/noticia_lamp_led.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5101:** iluminação pública: procedimento. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5410:** instalações elétricas de baixa tensão: aterramento. Rio de Janeiro, 2004. 142 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5641:** iluminação: terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL - CRESESB - Grupo de trabalho de energia solar. GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: PRODEEM, 2004. 52 p. (Edição especial PRC).

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL - CRESESB - Grupo de trabalho de energia solar. GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: PRODEEM, 2004. 131 p. (Edição especial PRC).

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA – CEPEL. **Potencial energético solar: SUNDATA**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#localidade_339>. Acesso em: 14 out. 2013

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Manual de iluminação pública**. Curitiba, 1998.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. **Manual de iluminação pública**. Curitiba, 1998.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRÁS. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa – ano base 2012**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2013. 19 p. Disponível em : <<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS6869AADAPTBRIE.htm>>. Acesso em: 20 set. 2013.

ESPAÇO SILÍCIO. **Relação: produção e consumo**. [S. l.], 2012. Disponível em: <<http://espacosilicio.blogspot.com.br/2012/11/relacao-producao-e-consumo.html>>. Acesso em: 13 mar. 2014.

FAGUNDES, M. C. **Alocação de geradores solares fotovoltaicos para sistemas autônomos em corrente contínua através de otimização clássica**. 2014. 62 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

FREEDOM. **Manual técnico bateria estacionária**. Sorocaba: [s. l.], 2008. Disponível em: <www.solenerg.com.br/files/ManualTecnicoFreedom.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2013.

GIANELLI, B. F. et al. **O emprego de tecnologia LED na iluminação pública: seus impactos na qualidade de energia e no meio ambiente**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Ilumina%E7%E3o%20P%FAblica/Artigo_s/o_emprego_de_tecnologia_led_na_iluminacao_publica_seus_impactos_na_qualidade_de_energia_e_no_meio_ambiente.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA - INMETRO. Normalização e qualidade industrial. **Portaria n.º 454**: requisitos de avaliação da conformidade para reatores eletromagnéticos para lâmpadas a vapor de sódio e lâmpadas a vapor metálico (halogenetos). Rio de Janeiro, 2010.

LUZ, J. M. **Curso de luminotécnica: conceitos e grandezas fundamentais**. Porto Alegre: [s. n.], 2012.

MCKINSEY AND COMPANY. **Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil**. São Paulo: MCKINSEY, 2010.

MICROGERAÇÃO DE ENERGIA. **Tudo sobre a microgeração EDP**. [S. l.], 2012. Disponível em: <<http://www.microgeracaodeenergia.com/geral/tudo-sobre-a-microgeracao-edp>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2013.

NASCIMENTO, A. **Análise do uso da tecnologia led na iluminação pública: estudo das perspectivas de aplicação na cidade de São Paulo**. 2012. 206 f. Dissertação (Mestrado em Energia Elétrica) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2012. Disponível em: <<http://pgene.ufabc.edu.br/conteudo/bloco2/publicacoes/Dissertacoes2012/DissertacaoAlanNascimento.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

PEREIRA, O. L. S. et al. Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de tubarão – SC. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 25-45, 2008. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/145062356/v14n01-Dimensionamento-de-Inversores-Para-Sistemas-Fotovoltaicos-Conectados-a-Rede-Eletrica-Estudo-de-Caso-Do-Sistema-de-Tubarao-Sc>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

PHILIPHS. **Luminárias**. São Paulo, 2013. Disponível em: <www.lighting.philips.com.br/connect/support/faq_luminarias.wpd> Acesso em: 11 de out. 2013.

POWER CLOUDS. **A reciclagem de módulos fotovoltaicos: uma mais-valia para o ambiente**. Singapura, 2013. Disponível em: <<http://www.powerclouds.com/index.php/a-reciclagem-de-modulos-fotovoltaicos-uma-mais-valia-para-o-ambiente/?lang=pt-br>>. Acesso em: 8 abr. 2014.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - PROCEL-ELEROBRAS. **Levantamento cadastral de pontos de iluminação pública instalados no Brasil**. Rio de Janeiro, 2008.

RENDÓN, R. G; ZULUAGA, A. E.; LÁZARO, R. R. **Programação linear inteira**. Incline Village: CPLEX Optimization Subroutine Library Guide and Reference, 2007.

RODRIGUES, C. R. B. S. et al. Um estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: estado sólido e lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 9., 2010, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: IEEE/IAS, 2010. p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5739987>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

SA, M. et al. **Leds em iluminação pública: tecnologias, desempenho e implantação**. 77. ed. São Paulo: Portal o Setor Elétrico, 2012. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed77_fasc_sistemas_iluminacao_cap6.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2014.

SCHUEDA, E. D. **Aplicação de ferramentas de georreferenciamento em iluminação pública e utilização de luminárias de alto rendimento**. 2011. 32 f Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em:
< <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/farias/materiais/316M.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

SERRÃO, M. A. D. **Dimensionamento de um sistema de um sistema fotovoltaico para uma casa de veraneio em Pouso da Cajaíba-Paraty**. 2010. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:
< <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000620.pd>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

SHAYANI, R. A; OLIVEIRA, M. A. G; CAMARGO, I. M. T. **Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO - CBPE, 5., 2006, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: CBPE, 2006.

SILVA, L. L. F. da. **Iluminação pública no Brasil: aspectos energéticos e institucionais**. 2006. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

TIMANE, H. A. **Princípio de funcionamento do sistema fotovoltaico ligado à rede pública**. Maputo: Universidade Eduardo Modlane, Faculdade de Ciências, 2010. Disponível em:
<https://energypedia.info/wiki/File:PT_SISTEMA_FOTOVOLTAICO_LIGADO_Timane.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2014.

VASCONCELOS, V. B. **Estudo de implantação de um sistema de microgeração distribuída residencial**. 2013. 153 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2013. Disponível em: <<http://gera.sr.ifes.edu.br/wp-content/uploads/2012/10/Estudo-de-Implanta%C3%A7%C3%A3o-de-um-Sistema-de-Microgera%C3%A7%C3%A3o-Distribu%C3%ADa-Residencial.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica conceitos e aplicações, sistemas isolados e conectados à rede**. São Paulo: Érica, 2012.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Hidrologia e Irrigação. **Dados climáticos: Ilha Solteira**. Ilha Solteira, 2013. Disponível em:
<http://clima.feis.unesp.br/recebe_mesatual.php?requiredataini=01/03/2014&requiredatafim=31/03/2014&estacao=1> Acesso em: 15 out. 2013.

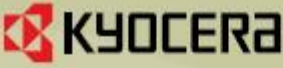
WWF-BRASIL. **Sumario para tomadores de decisão:** além de grandes hidroelétricas: políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. São Paulo, 2012. 29 f.

Disponível em:

<http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2014.

ANEXO A - Dados técnicos do painel solar Kyocera para a conexão a 12Vcc e 135 W
 Autor: KYOCERA Solar, Inc. 2014. Disponível em:
 <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5342.pdf>>

OFF-GRID
HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



KD 135 F, SX Series

KD135SX-LFBS KD1405X-LFBS

CUTTING EDGE TECHNOLOGY

As a pioneer with over 35 years in the solar energy industry, Kyocera demonstrates leadership in the development of solar energy products. Kyocera's Kaizen Philosophy, commitment to continuous improvement, is shown by repeatedly achieving world record cell efficiencies.

QUALITY BUILT IN




- UV stabilized, aesthetically pleasing black anodized frame
- Supported by major mounting structure manufacturers
- Easily accessible grounding points on all four corners for fast installation

RELIABLE

- Proven superior field performance
- Tight power tolerance
- Only module manufacturer to pass rigorous long-term testing performed by TÜV Rheinland


QUALIFICATIONS AND CERTIFICATIONS


UL Listing
QIGJE173074

Registered to ISO 9001-2000

NEC 2008 Compliant, UL 1703, ISO 9001, and ISO 14001
 UL1703 Certified and Registered, UL Fire Safety Class C, Class I, Div II
 Certified IEC61215 Ed 2 IEC61730 by JET





SOLAR by KYOCERA

Fonte: (www.kyocerasolar.com,2014)

KD 135 F, SX Series

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Standard Test Conditions (STC)
 STC = 1000 W/m² irradiance, 25°C module temperature, AM 1.5 spectrum*

	KD135SX-UFBS	KD140SX-UFBS	
P _{max}	135	140	W
V _{mp}	17.7	17.7	V
I _{mp}	7.63	7.91	A
V _{oc}	22.1	22.1	V
I _{sc}	8.37	8.68	A
P _{tolerance}	+5/-5	+5/-5	%

Nominal Operating Cell Temperature Conditions (NOCT)
 NOCT = 800 W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, AM 1.5 spectrum*

	KD135SX-UFBS	KD140SX-UFBS	
T _{NOCT}	45	45	°C
P _{max}	97	101	W
V _{mp}	16.0	16.0	V
I _{mp}	6.10	6.33	A
V _{oc}	20.2	20.2	V
I _{sc}	6.78	7.03	A

Temperature Coefficients

	KD135SX-UFBS	KD140SX-UFBS	
P _{max}	-0.45	-0.45	%/°C
V _{mp}	-0.52	-0.52	%/°C
I _{mp}	0.0066	0.0066	%/°C
V _{oc}	-0.36	-0.36	%/°C
I _{sc}	0.060	0.060	%/°C

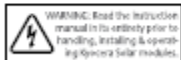
Operating Temp -40 to +90 -40 to +90 °C

System Design

Series Fuse Rating	15 A
Maximum DC System Voltage (UL)	600 V
Hailstone Impact (23m/s)	1 in (25mm) @ 51mph

* Subject to simulator measurement uncertainty of +/- 3%. KYOCERA reserves the right to modify these specifications without notice.

NEC 2008 COMPLIANT
 UL 1703 LISTED
 CERTIFIED IEC61215 ED2 IEC61730 BY I.E.T.



010412

OUR VALUED PARTNER

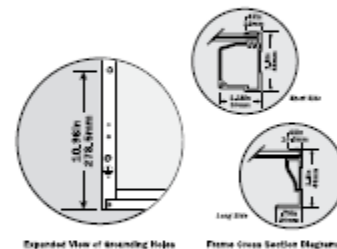
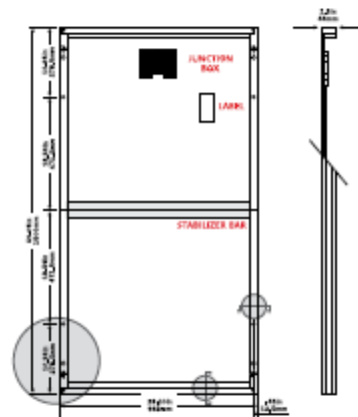
KYOCERA Solar, Inc. 800-223-9580 800-523-2329 fax www.kyocerasolar.com

MODULE CHARACTERISTICS

Dimensions: length/width/height	59.06in(26.30in)1.8in (1500mm)668mm)46mm)
Weight:	28.4lbs (12.9kg)

PACKAGING SPECIFICATIONS

Modules per pallet:	20
Pallets per 53' container:	54
Pallet box dimensions: length/width/height	63.19in(27.56in)49.02in (1605mm)700mm)1245mm)
Pallet box weight:	650lbs (295kg)



Expanded View of Mounting Holes Frame Cross Section Diagrams

Legend

○ MOUNTING HOLES .35in (9mm)	● DRAINAGE HOLES .35in (9mm)	● GROUND SYMBOL .35in (9mm)
------------------------------	------------------------------	-----------------------------

ANEXO B - Dados técnicos do painel solar Kyocera para a conexão a 24Vcc e 245W
 Autor: KYOCERA Solar, Inc. 2014. Disponível em: <
<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5125.pdf> >

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



KD 200-60 F Series

KD240GX-LFB KD245GX-LFB KD250GX-LFB

CUTTING EDGE TECHNOLOGY

As a pioneer with over 35 years in the solar energy industry, Kyocera demonstrates leadership in the development of solar energy products. Kyocera's *Kaizen* Philosophy, commitment to continuous improvement, is shown by repeatedly achieving world record cell efficiencies.

QUALITY BUILT IN

- UV stabilized, aesthetically pleasing black anodized frame
- Supported by major mounting structure manufacturers
- Easily accessible grounding points on all four corners for fast installation
- Proven junction box technology with 12 AWG PV wire to work with transformerless inverters
- Quality locking MC4 plug-in connectors to provide safe and quick connections

RELIABLE

- Proven superior field performance
- Tight power tolerance
- Only module manufacturer to pass rigorous long-term testing performed by TÜV Rheinland

QUALIFICATIONS AND CERTIFICATIONS

UL Listing
 QIGUE173074





Registered to ISO9001-2000

NEC 2008 Compliant, UL 1703, ISO 9001, and ISO 14001
 UL1703 Certified and Registered, UL Fire Safety Class C, CEC, FSEC




QUALIFIED FOR "BUY AMERICAN"

Manufactured in San Diego, California

• Available Upon Request •



SOLAR by KYOCERA



Fonte: (www.kyocerasolar.com,2014)

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Standard Test Conditions (STC) STC - 1000 W/M ² irradiance, 25°C module temperature, AM 1.5 spectrum*				
	KD240GX-LFB	KD245GX-LFB	KD250GX-LFB	
P _{mp}	240	245	250	W
V _{mp}	29.8	29.8	29.8	V
I _{mp}	8.06	8.23	8.39	A
V _{oc}	36.9	36.9	36.9	V
I _{sc}	8.59	8.91	9.09	A
P _{max}	+5/-3	+5/-3	+5/-3	%

Nominal Operating Cell Temperature Conditions (NOCT) NOCT - 800 W/M ² irradiance, 20°C ambient temperature, AM 1.5 spectrum*				
	KD240GX-LFB	KD245GX-LFB	KD250GX-LFB	
T _{NOCT}	45	45	45	°C
P _{nom}	172	176	180	W
V _{mp}	26.7	26.8	26.8	V
I _{mp}	6.45	6.58	6.72	A
V _{oc}	33.7	33.7	33.7	V
I _{sc}	6.95	7.21	7.36	A
PTC	217.3	219.1	223.7	W

Temperature Coefficients				
P _{max}	-0.46	-0.46	-0.46	%/°C
V _{mp}	-0.52	-0.52	-0.52	%/°C
I _{mp}	0.0064	0.0065	0.0065	%/°C
V _{oc}	-0.36	-0.36	-0.36	%/°C
I _{sc}	0.060	0.060	0.060	%/°C
Operating Temp	-40 to +90	-40 to +90	-40 to +90	°C

System Design	
Series Fuse Rating	15 A
Maximum DC System Voltage (UL)	600 V
Hailstone Impact	1 in (25mm) @ 51mph (23m/s)

* Subject to simulator measurement uncertainty of +/- 3%. KYOCERA reserves the right to modify these specifications without notice.

NEC 2008 COMPLIANT UL 1703 LISTED

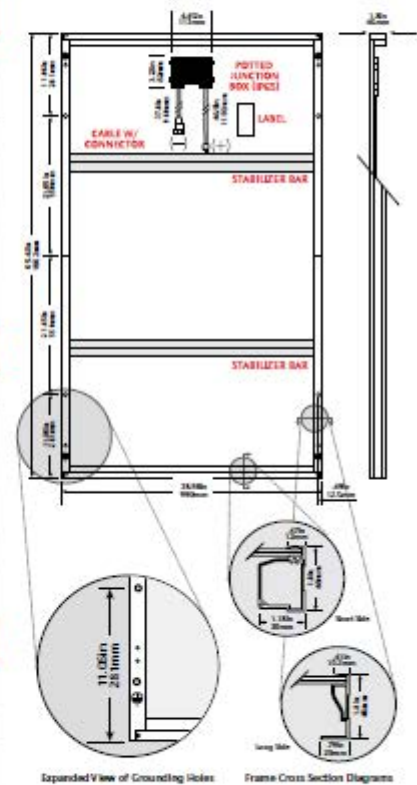
WARNING: Read the instruction manual in its entirety prior to handling, installing & operating Kyocera solar modules.

MODULE CHARACTERISTICS

Dimensions: length/width/height	65.43in/38.98in/1.8in (1662mm/990mm/46mm)
Weight:	46.3lbs (21.0kg)

PACKAGING SPECIFICATIONS

Modules per pallet:	20
Pallets per 53' container:	36
Pallet box dimensions: length/width/height	66in/40in/47in (1675mm/1005mm/1175mm)
Pallet box weight:	1040 lbs (470kg)



Legend

- MOUNTING HOLES .35in (9mm)
- DRAINAGE HOLES .35in (9mm)
- ⊕ GROUND SYMBOL .35in (9mm)

032912

OUR VALUED PARTNER

KYOCERA Solar, Inc. 800-223-9580 800-523-2329 fax www.kyocerasolar.com

Fonte: (www.kyocerasolar.com,2014)