

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Rafael Henrique Bandeira**

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS  
FOTOVOLTAICOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADO NA ANÁLISE DA  
DINÂMICA DIÁRIA DE GERAÇÃO E CONSUMO**

Santa Maria, RS, Brasil  
2018

**Rafael Henrique Bandeira**

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS  
FOTOVOLTAICOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADO NA ANÁLISE DA  
DINÂMICA DIÁRIA DE GERAÇÃO E CONSUMO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração em Processamento de Energia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Dalla Costa

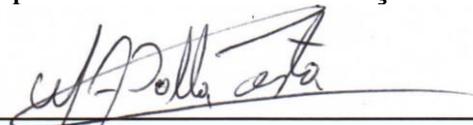
Santa Maria, RS, Brasil  
2018

**Rafael Henrique Bandeira**

**MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS  
FOTOVOLTAICOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADO NA ANÁLISE DA  
DINÂMICA DIÁRIA DE GERAÇÃO E CONSUMO**

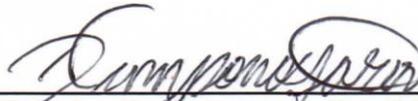
Dissertação apresentada ao Curso de  
Mestrado do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, área de concentração em  
Processamento de Energia da Universidade  
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como  
requisito parcial para obtenção do título de  
**Mestre em Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 26 de março de 2018



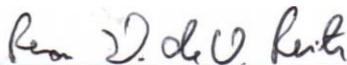
---

**Marco Antônio Dalla Costa, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Douglas Camponogara, Dr. (UFSM)**



---

**Renan Diego de Oliveira Reiter, Dr. (SONNEN)**

Santa Maria, RS  
2018

Bandeira, Rafael Henrique

MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS  
FOTOVOLTAICOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADO NA ANÁLISE DA  
DINÂMICA DIÁRIA DE GERAÇÃO E CONSUMO / Rafael Henrique  
Bandeira.- 2018.

97 p.; 30 cm

Orientador: Marco Antônio Dalla Costa  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2018

1. Sistemas Autônomos Fotovoltaicos 2. Iluminação  
Pública 3. Painéis Solares Fotovoltaicos 4. Banco de  
baterias 5. Iluminação a LED. I. Dalla Costa, Marco  
Antônio II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Rafael Henrique Bandeira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço:

Fone (0xx)55 99189-3693; E-mail: rafaelhbandeira@outlook.com



## AGRADECIMENTOS

*Agradeço aos meus pais, Dari e Terezinha Bandeira por possibilitarem e estimularem minha educação, fazendo-me chegar até onde estou.*

*À minha noiva Emanuele Bottega, por todo o apoio e segurança passado durante toda minha formação acadêmica, e por estar ao meu lado em todos os momentos.*

*A minha irmã Emanuelli Bandeira Avi pelo estímulo e exemplo na caminhada acadêmica e pelo apoio prestado nas dificuldades desta caminhada.*

*Aos demais familiares, amigos e colegas de graduação e pós-graduação pela amizade e carinho.*

*Aos familiares da minha noiva, pela confiança e apoio neste período, tornando possível a realização deste trabalho.*

*Ao Prof. Dr. Marco Antônio Dalla Costa, pela excelente orientação no desenvolvimento do Mestrado, sendo crucial para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.*

*Ao Prof. Dr. Leandro Michels por ter me apoiado durante minha pesquisa.*

*Ao Dr. Renan Diego de Oliveira Reiter, pela dedicação, ensinamentos, cobrança e apoio tanto na minha pesquisa quanto no âmbito pessoal, sendo um grande amigo nesta trajetória.*

*Aos colegas de profissão Leonardo Freitas Fleck, Marcelo Miorin Machline e Paulo Fernando Alves Filho por estarem sempre dispostos a auxiliar-me no decorrer deste mestrado.*

*A todos os colegas do GEDRE, pela amizade e auxílio no decorrer do mestrado, em especial ao Guilherme Gindri Pereira e Priscila Bolzan pela disposição em ajudar sempre que solicitados.*

*Ao PPGEE e todos os professores por serem sempre solícitos em auxiliar-me durante minhas pesquisas.*

*Ao CAPES por tornar possível a execução deste trabalho com o programa de bolsas de estudos.*

*À Universidade Federal de Santa Maria pela excelente qualidade na educação a mim fornecida.*

*Ao Núcleo ANIMA de Apoio a Aprendizagem na Educação em especial à psicóloga Tainara dos Santos de Moraes pelo acompanhamento nos momentos difíceis.*

*Por fim agradeço a todos não citados nominalmente neste agradecimento, mas que de alguma forma auxiliaram minha trajetória, possibilitando chegar onde estou.*

## RESUMO

### MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS FOTVOLTAICOS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA BASEADO NA ANÁLISE DA DINÂMICA DIÁRIA DE GERAÇÃO E CONSUMO

AUTOR: RAFAEL HENRIQUE BANDEIRA  
ORIENTADOR: MARCO ANTÔNIO DALLA COSTA

Este trabalho apresenta um método para análise e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos aplicados em iluminação pública empregando lâmpadas LED. Para realizar este dimensionamento, dados diários de produção e de consumo são empregados, aumentando a confiabilidade da metodologia proposta em relação a métodos baseados em médias mensais de irradiância. A determinação do consumo de energia diário foi obtida considerando-se a variação sazonal da duração dos dias ao longo do ano. A determinação de energia gerada pelo sistema considerou os diversos fatores que influenciam na geração, como a irradiância, a temperatura ambiente e a velocidade dos ventos. Para tanto empregaram-se os dados climatológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o dimensionamento do sistema. Foram realizadas simulações dos sistemas dimensionados pelo método tradicionalmente adotado para sistemas autônomos fotovoltaicos e pelo método de dinâmica diária de produção e consumo de energia, proposto neste trabalho. O dimensionamento baseado na análise dos dados da tabela apresentou um painel solar 66% maior que o painel dimensionado pelo método das médias mensais. Os métodos foram testados para situações de dimerização da carga, neste pode ser observado que o método de análise diária da produção e consumo apresentou melhores resultados, apesar de utilizar dois painéis solares, o que aumenta o custo estrutural. O método proposto, apresentou melhores resultados, possibilitando a diminuição de até 1kWh de capacidade de carga em alguns cenários estudados.

**Palavras-chave:** Sistemas Autônomos Fotovoltaicos. Iluminação Pública. Painéis Solares Fotovoltaicos. Banco de baterias. Iluminação a LED.

## ABSTRACT

### METHOD OF DIMENSIONING OF AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEMS OF PUBLIC LIGHTING BASED ON THE ANALYSIS OF THE DAILY GENERATION AND CONSUMPTION DYNAMICS

AUTHOR: RAFAEL HENRIQUE BANDEIRA  
ADVISOR: MARCO ANTÔNIO DALLA COSTA

This work presents a method for the analysis and sizing of autonomous photovoltaic systems applied in public lighting using LED lamps. To perform this sizing, daily production and consumption data are used, increasing the reliability of the proposed methodology in relation to methods based on monthly average irradiance. The determination of the daily energy consumption was obtained considering the seasonal variation of the days duration throughout the year. The determination of energy generated by the system considered the various factors that influence generation, such as irradiance, ambient temperature and wind speed. For this purpose, the climatological data provided by the National Institute of Meteorology (INMET) was used for system sizing. Simulations of the systems dimensioned by the method traditionally adopted for autonomous photovoltaic systems and by the daily dynamics of energy production and consumption method were carried out, proposed in this work. The design based on analysis of table data showed a 66% greater solar array panel scaled by the method of monthly averages. The methods were tested for load dimming situations, this can be observed that the method of analysis of the daily production and consumption showed better results, despite using two solar panels, which increases the cost structure. The proposed method showed better results, enabling a reduction of up to 1 kWh of load capacity in some scenarios studied.

**Keywords:** Photovoltaic Autonomous Systems. Street lighting. Photovoltaic Solar Panels. Battery bank. LED lighting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Conversão de energia de um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação em série. ....	17
Figura 2: Efeito fotovoltaico.....	18
Figura 3: Parâmetros elétricos do sistema fotovoltaico.....	19
Figura 4: Variação do MPP em relação aos níveis de irradiância e temperatura. ....	20
Figura 5: Técnica de condutância incremental. ....	21
Figura 6: Efeito memória.....	24
Figura 7: Conversão de energia de LEDs brancos a partir de LEDs azuis ou UV.....	29
Figura 8: Evolução da eficácia luminosa e projeção da eficácia do LED até 2020. ....	30
Figura 9: Emissão direcionada de luz.....	30
Figura 10: Princípio de funcionamento de um LED.....	31
Figura 11: Influência da Corrente direta e da temperatura de junção na vida útil dos LEDs...32	32
Figura 12: Métodos de dimerização. ....	33
Figura 13: Eficácia luminosa normalizada em relação à dimerização. ....	34
Figura 14: Relação entre corrente direta e fluxo luminoso. ....	34
Figura 15: Ganho da eficácia normalizada por dimerização. ....	35
Figura 16: Relação entre fluxo luminoso relativo e temperatura de junção.....	36
Figura 17: Variação das horas de noite no período de 1 ano.....	41
Figura 18: Radiação média mensal em Santa Maria para um ângulo de 50°. ....	42
Figura 19: Variação da radiação para uma instalação a 50° em relação ao desvio azimutal...43	43
Figura 20: Número de manchas solares identificadas por ano. ....	47
Figura 21: Consumo do sistema no decorrer do ano. ....	48
Figura 22: Influência da inclinação terrestre na posição do sol. ....	48
Figura 23: Representação gráfica (a) Visão isométrica. (b) Vista superior.....	49
Figura 24: Variação da radiação que atinge a terra ao longo do ano.....	52
Figura 25: Variação da massa de ar percorrido pelo raio solar no decorrer do dia. ....	53
Figura 26: Componentes da radiação solar.....	54
Figura 27: Comparativo entre geração produzida e calculada no estudo de caso. ....	58
Figura 28: Comportamento médio do banco de baterias e temperatura ao longo de um ano. .61	61
Figura 29: Dimerização linear. ....	62
Figura 30: Dimerização linear abaixo de 75%. ....	63
Figura 31: Dimerização linear abaixo de 50%. ....	64
Figura 32: Dimerização Escalonada (50/100). ....	64
Figura 33: Dimerização escalonada (30/60/100) restritiva.....	65
Figura 34: Dimerização em escala de 10.....	66
Figura 35: Dimerização em escala de 20.....	66
Figura 36: Diagrama de blocos para obtenção da radiação extraterrestre. ....	70
Figura 37: Média de dias com produção maior que consumo por ano no período estudado. ..76	76
Figura 38: Média anual de dias com bateria completamente descarregada em relação à capacidade de carga adotada.....	78
Figura 39: Dias sem iluminação em relação à capacidade de carga do banco de baterias e à potência de geração fotovoltaica. ....	79
Figura 40: Comparativo dos resultados de dimerização linear por ambos métodos de dimensionamento.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lógica do método Perturbação e Observação. ....	21
Tabela 2: Irradiação Solar diária média mensal para determinados ângulos de inclinação em Santa Maria/RS.....	22
Tabela 3: Parâmetros da luminária Zagonel ZL49 de 60W.....	40
Tabela 4: Fator de correção dos módulos fotovoltaicos. ....	44
Tabela 5: Intensidade das componentes da radiação para cada tipo de dia. ....	54
Tabela 6: Comparativo de dados referentes a painéis fotovoltaicos. ....	56
Tabela 7: Sistema utilizado para comprovação do método de dimensionamento. ....	57
Tabela 8: Parâmetros para cálculo do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.....	72
Tabela 9: Comportamento do sistema para as cada dimerização considerando painel solar de 330Wp e banco de baterias de 3,4kWh. ....	74
Tabela 10: Dimensionamento do banco de baterias com o sistema dimerizado. ....	75
Tabela 11: Características técnicas do painel dimensionado.....	77
Tabela 12: Comportamento do sistema para as cada dimerização considerando painel solar de 330Wp e banco de baterias de 3,6kWh, no período de 11 anos. ....	80
Tabela 13: Dimensionamento do banco de baterias e comportamento do sistema dimerizado para o sistema dimensionado com 2 painéis de 275Wp. ....	81
Tabela 14: Sistemas projetados para dimerização linear. ....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AlGaInP - Alumínio Gálio Índio Fosfeto
- AM – *Amplitude Modulation* (Modulação de Amplitude)
- BB – Banco de Baterias
- CC – Corrente Contínua
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- CRESESB – Centro e Referência para Energia Solar e Eólica
- CV – *Constant Voltage* (Tensão Constante)
- dn – Dia do ano
- FCP – Fator de correção do painel
- FP – Fator de Produção
- GMT – *Greenwich Meridian Time* (horário em relação ao meridiano de Greenwich)
- HC – *Hill Climbing* (Escalando o Monte)
- hl – Hora Local
- IncCond – *Incremental Conductance* (Condutância Incremental)
- Incl – Inclinação
- InGaN - Índio Gálio Nitrito
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de luz)
- Li-Ion – Íons de Lítio
- Lm – Lumens
- MPP – *Maximum Power Point* (Ponto de Máxima Potência)
- MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreador de Ponto de Máxima Potência)
- NiCd – Níquel Cádmio
- Ni-MH – Níquel Hidreto Metálico
- P&O – *Perturbation and Observation* (Perturbação e Observação)
- PbSO<sub>4</sub> – Chumbo ácido
- PV – *Photovoltaic* (fotovoltaico)
- PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação de Largura de Pulso)
- RGB – *Red, Green and Blue* (Vermelho, Verde e Azul)
- Si – Silício
- SiC – Carbetto de Silício
- SP – Sol Pleno

UTC – *Universe Time Coordinated* (Coordenadas universais de tempo)

UV – Ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\hat{t}_{pv}$  – Temperatura do painel solar
- $\hat{i}_{dif\ pv}$  – Radiação difusa incidente no painel solar
- $\hat{i}_{dif}$  – Radiação difusa na superfície terrestre
- $\hat{i}_{dir\ pv}$  – Radiação direta incidente no painel solar
- $\hat{i}_{dir}$  – Radiação direta na superfície terrestre
- $\hat{i}_{rfl\ pv}$  – Radiação refletida incidente no painel solar
- $A_{pv}$  – Área do painel solar
- $E_0$  – Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre
- $K_{pv}$  – Coeficiente de perdas do painel fotovoltaico em função da temperatura
- $T_n$  – Horas de noite
- $f_{rfl}$  – Fator de reflexão dos módulos fotovoltaicos
- $i_0$  – Radiação extraterrestre
- $k_t$  – Índice de limpidez atmosférica
- $r_b$  – Fator de correção geométrica
- $t_{amb}$  – Temperatura ambiente
- $v_{vto}$  – Velocidade do vento
- $\gamma_{pv}$  – Azimute do módulo fotovoltaico
- $\gamma_z$  – Ângulo de azimute solar
- $\eta_{Bat}$  – Rendimento do banco de baterias
- $\eta_{PV}$  – Rendimento do painel fotovoltaico
- $\eta_{cab}$  – Rendimento do cabeamento
- $\eta_{car}$  – Rendimento do carregador de baterias
- $\eta_{driver}$  – Rendimento do driver LED
- $\theta_z$  – Ângulo zenital
- $\rho_1$  – Albedo da superfície terrestre
- d – Distância do condutor
- D – *Duty Cycle* (Ciclo de Trabalho)
- dt – Ajuste de horário em relação ao horário de verão
- E – Equação do tempo
- h- Horas
- I – Corrente que passa pelo condutor

$I_{LED}$  – Corrente nos LEDs  
 $I_{mpp}$  – Corrente no ponto de máxima potência  
 $I_{nom}$  – Corrente Nominal  
 $I_{sc}$  – Corrente de curto circuito  
 $k$  – Constante de relação percentual linear  
 $lst$  – Hora local em graus  
 $T$  – *Time* (Período)  
 $T_d$  – Horas de dia  
 $T_j$  – Temperatura de Junção  
 $t_{on}$  – *Time On* (Tempo Ligado)  
 $V_{mpp}$  – Tensão no ponto de máxima potência  
 $V_{oc}$  – Tensão de circuito aberto  
 $W$  – Watt  
 $Wh$  – Watt-hora  
 $Wp$  – Watt-pico  
 $\beta$  – Declive  
 $\Gamma$  – Ângulo do dia em graus  
 $\delta$  – Declinação solar  
 $\Delta V$  – Queda de tensão tolerada no cabeamento  
 $\rho$  – Resistividade do material do condutor  
 $\sigma$  – Longitude local  
 $\omega$  – Ângulo de hora solar  
 $i$  – Radiação na superfície terrestre  
 $\alpha$  – Ângulo de altitude solar  
 $\gamma$  – Desvio azimutal do módulo fotovoltaico  
 $\eta$  – Rendimento  
 $\theta$  – Ângulo de incidência solar  
 $\phi$  – Latitude local

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>12</b>
1.1	Contextualização .....	12
1.2	Definição do problema e contribuição.....	13
1.3	Resultados esperados .....	15
1.4	Delimitações do trabalho .....	15
1.5	Organização da dissertação .....	15
<b>2</b>	<b>Sistemas Fotovoltaicos Autônomos de iluminação .....</b>	<b>17</b>
2.1	Introdução.....	17
2.2	Fonte geradora - Painel solar .....	17
2.2.1	<i>Maximum Power Point Traking</i> (MPPT) .....	19
2.2.2	Posição do painel.....	22
2.3	Armazenamento de energia - Banco de Baterias.....	22
2.3.1	Efeito memória .....	24
2.3.2	Tipos de baterias.....	25
2.4	Carga - Lâmpada LED.....	28
2.4.1	Dimerização.....	32
2.5	Conclusão .....	36
<b>3</b>	<b>Dimensionamento de Sistema Autônomo Fotovoltaico baseado nas médias mensais e anuais.....</b>	<b>38</b>
3.1	Introdução.....	38
3.2	Rendimento do sistema.....	38
3.3	Determinação do consumo .....	39
3.4	Projeto e dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.....	41
3.4.1	Níveis de radiação solar.....	41
3.4.2	Dimensionamento dos painéis .....	43
3.5	Dimensionamento do banco de baterias .....	44
3.6	Conclusão .....	45
<b>4</b>	<b>Dimensionamento de sistemas autônomos fotovoltaicos por análise da dinâmica diária de produção e consumo.....</b>	<b>46</b>
4.1	Introdução.....	46
4.2	Ciclo solar – Definição de amostragem.....	46
4.3	Previsão do consumo para cada dia do ano .....	47
4.4	Determinação da produção diária de energia .....	48
4.4.1	Determinação da posição do sol .....	48
4.4.2	Calculo da radiação extraterrestre ( $i_0$ ) .....	51
4.4.3	Radiação na superfície terrestre ( $i$ ).....	52
4.4.4	Irradiação solar direta e difusa na superfície terrestre.....	53
4.4.5	Estimativa da irradiância direta, difusa e refletida incidente sobre o painel .....	55
4.4.6	Estimativa da geração do painel por hora.....	55
4.4.7	Estimativa da temperatura do módulo .....	56
4.5	Comprovação do método.....	56
4.6	Conclusão .....	58
<b>5</b>	<b>Estratégias de dimerização .....</b>	<b>60</b>

5.1	Introdução.....	60
5.2	Dimerização da carga .....	60
5.3	Estratégias de dimerização .....	61
5.3.1	Dimerização linear.....	62
5.3.2	Dimerização linear abaixo de 75% .....	63
5.3.3	Dimerização linear abaixo de 50% .....	63
5.3.4	Escalonada (50/100) .....	64
5.3.5	Escalonada (30/60/100) restritiva.....	65
5.3.6	Escala de 10 .....	65
5.3.7	Escala de 20 .....	66
5.3.8	Dimerização fixa 50/50 .....	66
5.4	Conclusão .....	67
<b>6</b>	<b>Aplicação das metodologias e análise de resultados .....</b>	<b>68</b>
6.1	Introdução.....	68
6.2	Determinação do consumo e produção do sistema para dia estudado.....	69
6.2.1	Determinação da posição do Sol e radiação extraterrestre .....	69
6.2.2	Definição das componentes diretas e difusa.....	70
6.2.3	Determinação do consumo e produção do sistema.....	70
6.3	Dimensionamento pelo método de médias mensais .....	71
6.3.1	Consumo do sistema.....	71
6.3.2	Dimensionamento da potência de geração .....	71
6.3.3	Dimensionamento do banco de baterias .....	72
6.3.4	Análise de dimerização para o método de médias mensais.....	73
6.3.5	Dimensionamento das baterias para cada método de dimerização.....	74
6.4	Dimensionamento do sistema a partir do método de análise da dinâmica diária.....	75
6.4.1	Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos .....	75
6.4.2	Dimensionamento do banco de baterias .....	77
6.4.3	Análise de dimerização para o sistema dimensionado a partir da tabela de geração e consumo.....	80
6.4.4	Dimensionamento das baterias para cada método de dimerização.....	81
6.5	Conclusão .....	82
<b>7</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>84</b>
7.1	Conclusão geral .....	84
7.2	Trabalhos futuros .....	85
<b>8</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contextualiza os sistemas autônomos fotovoltaicos de iluminação pública, onde os mesmos são necessários e as particularidades desse tipo de sistema. Também são apresentadas as características a serem observadas no dimensionamento de um sistema autônomo de iluminação e os diferenciais buscados na realização desse estudo.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil possui a quarta maior malha rodoviária do planeta com mais de 1,8 milhão de quilômetros de estradas e rodovias nacionais (CIA, 2017). Devido a essa extensão e ao grande número de veículos que nela transitam, há um elevado número de acidentes ocorrendo anualmente no Brasil. Grande parte desses acidentes ocorre por falta de sinalização e iluminação adequada nas rodovias (CHAGAS, 2011). Devido a isso, uma iluminação pública de qualidade nas rodovias é necessária para garantir a segurança do trânsito.

Sistemas autônomos de energia caracterizam-se por produzir e armazenar energia para utilização em períodos de necessidade, sem depender da rede elétrica convencional para demanda de energia elétrica (SOUSA e ZAMPERIN, 2017). Os sistemas fotovoltaicos autônomos possuem, por característica, utilizar apenas painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora. Como o Sol é uma fonte intermitente, precisa-se de um sistema de armazenamento de energia, geralmente um banco de baterias, para garantir o suprimento de energia a carga à noite (SEGUEL, 2009; VERA, 2004).

Apesar da vasta abrangência do sistema interligado nacional, o mesmo não consegue fornecer energia a todas as localidades do país. Por isso, em muitas rodovias, principalmente distantes de centros urbanos, ocorre a necessidade de iluminação pública sem que haja o acesso à rede de distribuição de energia para alimentação. Com isso, se faz necessário a utilização de sistemas autônomos de iluminação. O sistema autônomo de iluminação considerado nesse trabalho é o utilizado em rodovias, trevos ou cruzamentos, onde se necessita iluminação nos períodos em que a iluminação natural não se faz presente.

A fonte de energia de sistemas de iluminação autônomos a ser utilizada deve apresentar mínima manutenção, elevada confiabilidade e uma boa relação custo-benefício. Nessa aplicação, geradores a diesel não se mostram interessantes, tendo em vista que apresentam necessidade de manutenção periódica para reabastecimento de combustível e do seu sistema mecânico. Geradores fotovoltaicos e eólicos são alternativas mais atrativas

(DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010). Sistemas fotovoltaicos se sobressaem aos sistemas de geração eólica por apresentarem uma fonte presente em todos os locais onde há significativa presença humana, além de apresentar mínima manutenção por não possuir partes móveis, tendo estes uma vida útil superior aos 25 anos (CANADIAN, 2017).

A utilização de energia fotovoltaica também é atrativa quando se tem vista a conversão da energia gerada até a carga. Nos painéis solares fotovoltaicos a energia é gerada em corrente contínua (CC), como a carga LED é alimentada também em corrente contínua, a utilização de um inversor no sistema é dispensado, aumentando a eficiência e reduzindo seu custo (DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010). Lâmpadas LED apresentam-se, atualmente, como a melhor opção para essa aplicação, pois além de serem acionadas por corrente contínua, possuem elevada vida útil e elevada eficácia luminosa (BENDER, 2012; MELO, 2014; PINTO, 2012).

Na aplicação considerada nesse estudo, o uso de banco de baterias é compulsório devido ao fato da geração e consumo do sistema ocorrerem em momentos distintos. Outro fator que obriga o uso de banco de baterias é a intermitência da geração fotovoltaica, uma vez que esta depende de fatores climáticos para que haja geração.

Para que o sistema solar autônomo fotovoltaico de iluminação opere de forma satisfatória, devem ser escolhidos os componentes adequados para instalação, como o banco de baterias e o painel solar que melhor se adaptem. O conhecimento dos componentes utilizados é esperado juntamente com o dimensionamento adequado dessas partes.

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E CONTRIBUIÇÃO

Convencionalmente, os sistemas fotovoltaicos autônomos utilizam metodologias para dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e bancos de baterias baseados em médias mensais de geração fotovoltaica (CEPEL-CRESESB, 2014; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; FREITAS, 2008; IMHOFF, 2007; SOUSA e ZAMPERIN, 2017). Essa metodologia de projeto é simples e fácil de aplicar, porém apresenta baixa precisão, uma vez que considera as médias mensais de produção e as médias anuais de consumo.

O consumo de um sistema fotovoltaico de iluminação está atrelado ao número de horas que a lâmpada estará ligada durante o dia. Em regiões com latitudes mais altas, principalmente abaixo dos trópicos, há uma variação no número de horas durante a noite para cada período do ano (BORGES, 2016). No inverno dessas regiões o período noturno costuma

ser significativamente superior ao verão. Assim sendo, quando a análise da carga é realizada por médias, essa variação apresenta uma margem de erro considerável.

A produção de energia por meio de geradores solares fotovoltaicos por sua vez, tem relação direta com a radiação incidente sobre o painel solar (REITER, 2016). A radiação solar depende do número de horas de dia e do clima na região onde o painel solar encontra-se instalado, sendo que períodos com pouca radiação solar acarretam em menores índices de geração de energia. Essa dependência das condições climáticas é o que torna o gerador fotovoltaico uma fonte intermitente. Assim, o dimensionamento através da média mensal de produção é crítico, uma vez que não são consideradas questões como a frequência e duração dos períodos de baixa radiação, pois somente é observada a média diária no final do mês.

Espera-se que um sistema de iluminação pública tenha uma relação custo-benefício otimizada e que seja confiável. Para que se atinjam essas características, é necessário garantir que o sistema fotovoltaico, o banco de baterias e a lâmpada LED sejam dimensionados de forma precisa com relação às necessidades de cada local. Uma solução para essa questão encontra-se no estudo da dinâmica de geração e consumo diário de energia.

O estudo do comportamento diário do clima e da quantidade de horas diurnas e noturnas possibilita identificar com precisão a capacidade de produção e o consumo para cada dia. Então, pode-se efetuar o dimensionamento de painéis solares e banco de baterias elaborando um sistema que se adeque da melhor forma para o local estudado. Entretanto, ao estudar situações climáticas, um número elevado de dados deve ser obtido, analisado e processado. O estudo de um período curto de tempo é suscetível a erros provenientes de eventos climáticos esporádicos. Logo, o estudo precisa ser realizado considerando um período longo de tempo.

Esse trabalho tem o objetivo de dimensionar um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação pública baseado na dinâmica diária de geração e consumo de energia num período longo de tempo, para obtenção de maior precisão dos resultados. Além disso, busca-se analisar o comportamento do sistema, dimerizando o mesmo e comparando-o ao método comumente adotado para dimensionar sistemas fotovoltaicos autônomos (CEPEL-CRESESB, 2014; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; FREITAS, 2008; IMHOFF, 2007; SOUSA e ZAMPERIN, 2017), possibilitando a análise da viabilidade da utilização desse método para dimensionar sistemas de iluminação pública.

Por fim, a posse das informações de geração e produção possibilita o estudo relativo à dimerização da carga, sendo essa uma importante ferramenta para garantir o mínimo de

iluminação quando ocorrem longos períodos de baixa radiação, sem que o sistema precise ser superdimensionado.

### 1.3 RESULTADOS ESPERADOS

Analisando diariamente o comportamento do sistema por um longo período de tempo, espera-se obter uma ferramenta para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação pública. Essa deve possuir alto grau de confiabilidade, possibilitando o dimensionamento preciso através da análise retroativa do sistema a partir de simulação. Será dimensionado um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação pública na cidade de Santa Maria/RS para validação do método.

### 1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho limita-se a demonstrar um método de cálculo para dimensionar um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação pública a partir de análise da dinâmica diária de consumo e produção de energia dentro de um período determinado de tempo.

### 1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Os capítulos subsequentes desta dissertação estão estruturados da seguinte forma:

No segundo capítulo são apresentados os componentes de um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação pública. O conceito do sistema é apresentado, bem como os principais componentes: painel solar, banco de baterias e luminárias LED. Um estudo bibliográfico sobre esses componentes bem como a escolha dos mesmos para que estes se adequem a aplicação é elaborado.

O terceiro capítulo apresenta o método de dimensionamento comumente adotado para dimensionar sistemas fotovoltaicos autônomos em geral, adaptando e desenvolvendo o dimensionamento desse para iluminação pública.

O quarto capítulo apresenta os cálculos para determinação da radiação solar em cada hora e dia do ano, cálculos de consumo diário de um sistema de iluminação pública e de capacidade de geração a partir de uma fonte fotovoltaica.

O quinto capítulo apresenta um estudo sobre dimerizações. São apresentadas algumas estratégias de dimerização baseadas na carga do banco de baterias no período do anoitecer.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos para dimensionamento através do método que utiliza os valores médios de radiação e consumo, e pelo método de dimensionamento diário de energia. Além disso, também são testadas e comparadas as estratégias de dimerização.

As análises e conclusões finais deste trabalho são apresentadas no sétimo capítulo da dissertação. A aplicação do método de dimensionamento e os trabalhos futuros que podem ser executados a partir deste também são expostos nesse capítulo.

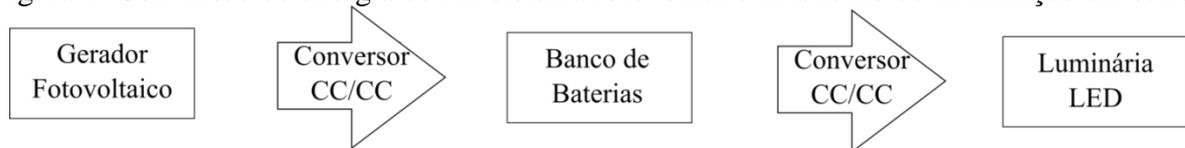
## 2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS DE ILUMINAÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação bem como o princípio de funcionamento deste sistema. Também apresenta os componentes utilizados neste sistema, sendo o banco de baterias como armazenador de energia, painéis solares fotovoltaicos como fonte geradora e lâmpadas de LED como a carga do sistema.

### 2.1 INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas fotovoltaicos autônomos para iluminação pública se justifica por possuir um potencial expressivo de geração em praticamente todos os locais onde há significativa presença humana, além de apresentar mínima manutenção por não possuir partes móveis (DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010). Sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação pública trabalham comumente com uma ligação em série, como pode ser visto na Figura 1. Nessa aplicação, o uso de acumuladores de energia é compulsório devido à necessidade das lâmpadas operarem quando não há irradiância solar. Tanto as baterias quanto a geração necessitam de um dimensionamento preciso para garantir a adequada operação do sistema de iluminação.

Figura 1: Conversão de energia de um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação em série.



Fonte: Autor

A fonte geradora utilizada são painéis fotovoltaicos, o acumulador de energia presente é um banco de baterias e a carga são lâmpadas LED. Nessa configuração todo o sistema trabalha em corrente contínua (CC) e em baixa tensão, o que possibilita a utilização de conversores de alto rendimento (DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010).

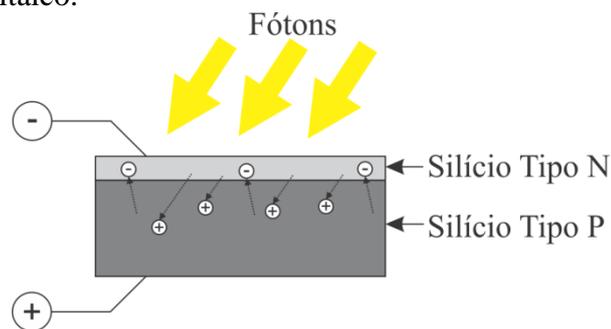
### 2.2 FONTE GERADORA - PAINEL SOLAR

Em 1839 Edmond Becquerel observou que a incidência de luz sobre uma célula eletrolítica originava uma tensão e corrente elétrica denominando este fenômeno de efeito

fotovoltaico. No ano de 1873, W. Smith observou variação na capacidade de condução do selênio pelo efeito da luz. Em 1888, Hertz deduziu que os metais emitiam elétrons pela ação da luz e, com o desenvolvimento dos materiais semicondutores no decorrer dos anos, em 1954 foi produzida a primeira célula solar de silício monocristalino (CARERIZO, 2008; CIEMAT, 1992; DAVIDSON e ORNER, 2008; TREBLE, 1991).

Painéis solares são compostos por células fotovoltaicas, nas quais há uma camada de material tipo N e outra camada maior de material tipo P. O lado P é dopado positivamente, fazendo com que haja excesso de elétrons no material. No entanto, o material N é dopado negativamente, gerando nesse material uma falta de elétrons, formando uma junção P-N. Ao incidir luz sobre uma célula fotovoltaica, a mesma faz a corrente elétrica fluir entre as duas camadas, através do efeito fotovoltaico, demonstrado na Figura 2. O fluxo elétrico será diretamente proporcional à luz incidente sobre a célula solar (NASCIMENTO, 2004; SERRÃO, 2010).

Figura 2: Efeito fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2004).

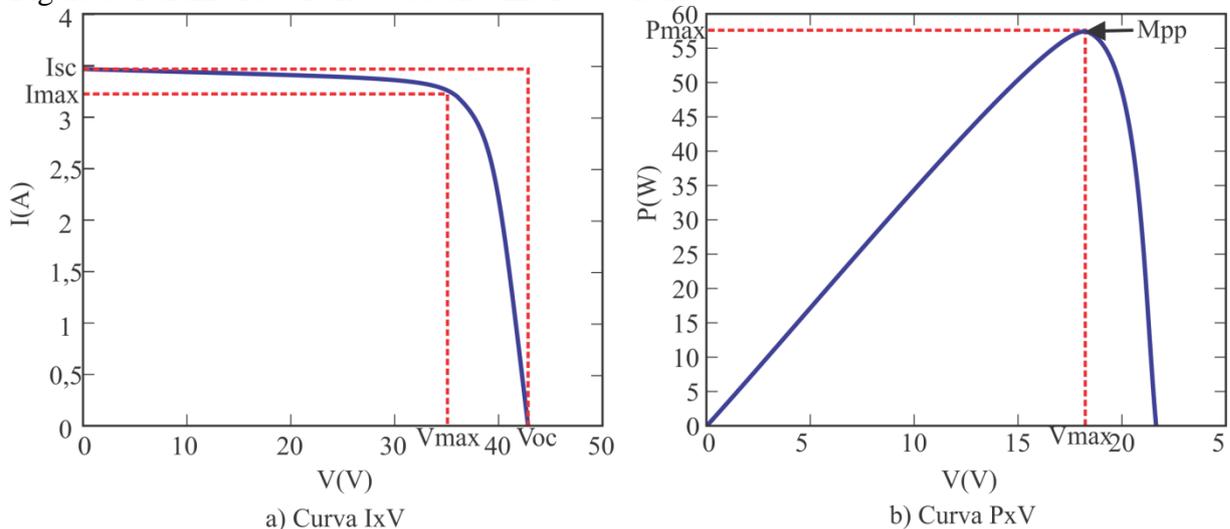
Os parâmetros elétricos a serem observados num painel solar fotovoltaico são:

- *Maximum Power Point* - Ponto de máxima potência (MPP): Indica o ponto de operação considerando a corrente e tensão do painel solar com maior potência gerada, onde a máxima potência pode ser alcançada em determinada condição de utilização.
- Tensão de máxima potência ( $V_{mpp}$ ): Tensão no ponto de máxima potência.
- Corrente de máxima potência ( $I_{mpp}$ ): Corrente no ponto de máxima potência.
- Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ): Valor máximo da corrente gerado pelo efeito fotovoltaico.

- Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): Maior valor de tensão possível de se obter nos terminais do módulo, quando não há nenhuma carga.

Estas características podem ser observadas na Figura 3, que representa as características elétricas de um sistema fotovoltaico. Na Figura 3(a) observa-se uma tensão e corrente para qual a potência máxima pode ser extraída, assim a potência máxima corresponde ao produto da tensão ( $V_{max}$ ) e corrente ( $I_{max}$ ) (CEPEL-CRESESB, 2014). Até o valor de MPP o módulo se comporta similarmente a uma fonte de corrente. A partir desse ponto o valor de  $I_{max}$  decai muito, diminuindo a potência drasticamente, como se pode observar na Figura 3(b) (SEGUEL, 2009).

Figura 3: Parâmetros elétricos do sistema fotovoltaico.



Fonte: (SEGUEL, 2009).

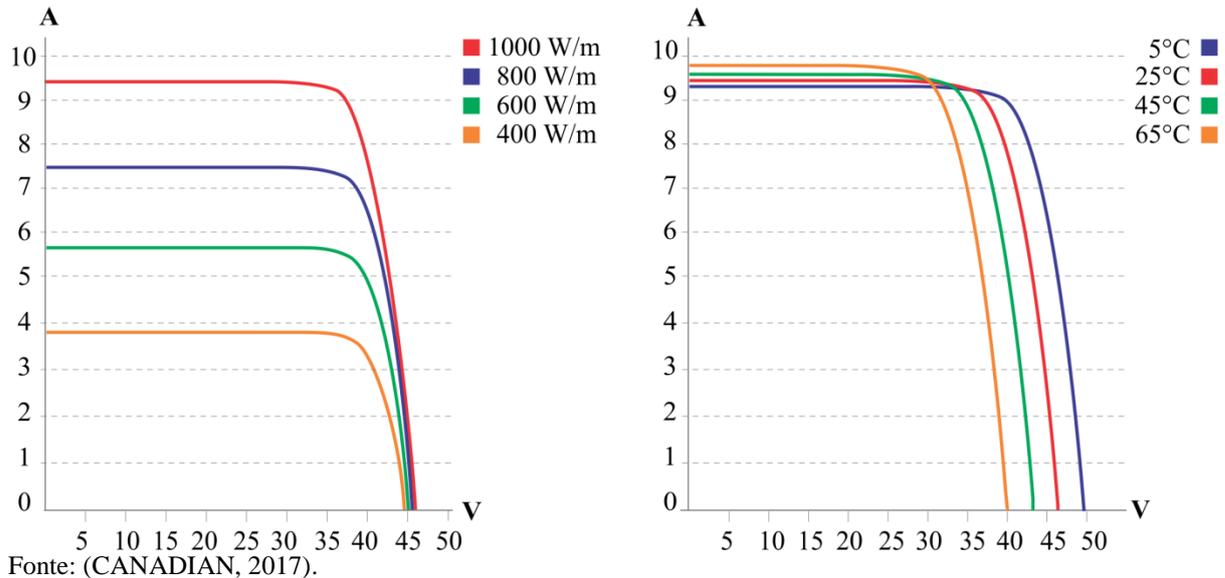
As células fotovoltaicas possuem isoladamente uma capacidade reduzida de produção de energia elétrica, fazendo necessária a associação de várias células em ligações série e paralelo, formando os painéis fotovoltaicos. As células fotovoltaicas mais comuns utilizam silício (Si) e podem ser constituídas de metais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo (IMHOFF, 2007).

### 2.2.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Para garantir o máximo aproveitamento da capacidade energética do painel solar fotovoltaico o mesmo deve operar constantemente no ponto de máxima potência. Como demonstrado na Figura 4, esse ponto varia no decorrer do dia, dependendo das condições de irradiância e temperatura. Para aumentar a eficiência do sistema, o controle de carga deve

buscar a operação dos painéis sempre naquele ponto. Dessa maneira, é necessária a utilização de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência ou do inglês *Maximum Power Point Traking* (MPPT) (SEGUEL, 2009).

Figura 4: Variação do MPP em relação aos níveis de irradiância e temperatura.  
Canadian Solar CS6U-335M / I-V CURVES



Fonte: (CANADIAN, 2017).

Existem inúmeras técnicas de rastreamento de MPPT. Dentre essas as que mais se destacam são (BARRETO, 2014; ESRAM e CHAPMAN, 2007; JAIN e AGARWAL, 2007):

- *Constant Voltage* (tensão constante) – CV: Este método considera uma relação percentual linear ( $k$ ) entre a tensão de máxima potência ( $V_{mpp}$ ) e a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) independente de condições de irradiância e temperatura. Periodicamente, o conversor desconecta-se e observa a tensão de  $V_{oc}$ , ajustando então a tensão  $V_{mpp}$ . Essa técnica apresenta algumas desvantagens, como a utilização de chaves auxiliares para desconexão dos painéis e a ocorrência de uma falta momentânea de energia ao fazer a verificação de  $V_{oc}$ . Entretanto, a principal desvantagem desse método é o erro em regime permanente.

$$V_{mpp} \approx k \cdot V_{oc} \quad (1)$$

- *Perturbation and observation* (perturbação e observação) – P&O: É uma técnica de fácil implementação que consiste em perturbar a tensão no arranjo fotovoltaico e observar a potência de saída, comparando com a potência anterior para definir o sentido da próxima perturbação, de acordo com a Tabela 1. Entre as limitações dessa técnica, destaca-se a presença de erro em regime

permanente, resposta dinâmica lenta e operação fora do ponto de máxima potência quando ocorrem variações abruptas de radiação solar e temperatura.

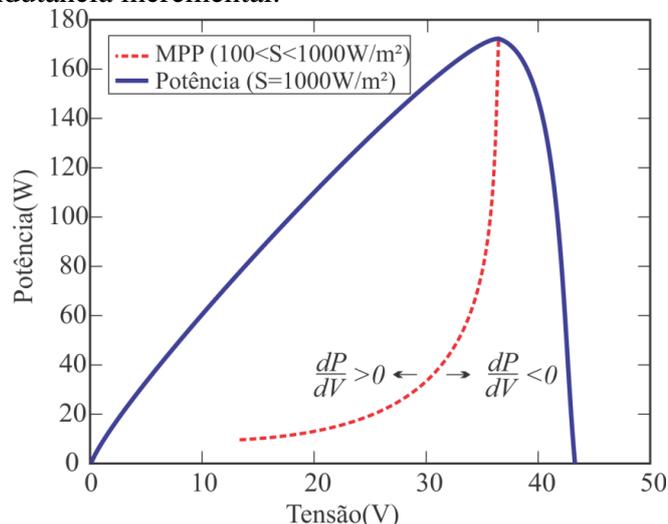
Tabela 1: Lógica do método Perturbação e Observação.

Sentido da perturbação atual	Variação da Potência	Sentido da próxima perturbação
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Fonte: (BARRETO, 2014).

- *Hill Climbing* – HC: Esta técnica é uma modificação da estrutura P&O, sendo conhecido como P&O modificado. A técnica HC possui como diferencial a perturbação inserida no ciclo de trabalho do conversor. Tanto para o P&O convencional quanto para o modificado o valor de incremento influenciará na dinâmica, tendo um valor elevado para grandes oscilações em regime permanente, já um valor incremental menor levará um maior tempo de acomodação.
- *Incremental Conductance* (condutância Incremental) – IncCond: Esta técnica utiliza-se da curva de potência versus tensão. Monitora-se a condutância incremental e instantânea do arranjo fotovoltaico a partir das medições da corrente e tensão do mesmo. A partir desses valores pode-se determinar em que lado da curva de potência o sistema se encontra, bem como quando o sistema está operando no ponto de MPP a partir da derivada da potência, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Técnica de condutância incremental.



Fonte: (SEGUEL, 2009).

### 2.2.2 Posição do painel

Ao desenvolver o projeto de um sistema solar fotovoltaico, deve-se analisar o ângulo de instalação dos painéis solares. Como pode ser verificado na Tabela 2, para cada ângulo de instalação são obtidos diferentes níveis de irradiação no decorrer do ano. Quando conectados à rede, sistemas fotovoltaicos tendem a ser projetados para garantir a maior produção de energia possível, independente da constância dessa produção no decorrer dos meses. Isso se justifica em sistemas conectados à rede de distribuição onde o excedente de uma época do ano pode ser utilizado em outra.

Tabela 2: Irradiação Solar diária média mensal para determinados ângulos de inclinação em Santa Maria/RS.

Incl	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Méd
0°	6,49	5,99	5,01	3,89	2,80	2,34	2,55	3,30	3,78	4,93	6,27	6,84	4,52
30°	5,72	5,31	4,69	3,76	3,31	3,52	4,14	4,13	4,85	5,66	5,92	4,73	2,61
24°	6,04	5,90	5,34	4,57	3,57	<b>3,11</b>	3,33	3,99	4,12	4,97	5,93	6,27	<b>4,76</b>
50°	4,70	4,94	4,92	4,69	3,96	<b>3,56</b>	3,76	4,24	3,93	4,30	4,70	4,77	<b>4,37</b>

Fonte: (CEPEL-CRESESB, 2017).

Entretanto, para projetos de sistemas autônomos, o armazenamento da energia limita-se ao banco de baterias presente no mesmo. Assim, para obter o melhor aproveitamento da energia, os painéis devem ser postos na angulação que garanta o maior valor de radiação mínima mensal (IMHOFF, 2007). Como pode ser observado na Tabela 2, para um sistema instalado a 24° ao norte a radiação média é a maior possível, porém o menor mínimo mensal encontra-se bem abaixo do valor quando comparado a um ângulo de 50°. Assim, para um sistema fotovoltaico autônomo instalado em Santa Maria/RS, o ângulo ideal de instalação é de 50° uma vez que apresenta maiores valores para os períodos de inverno.

### 2.3 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA - BANCO DE BATERIAS

Devido à dependência de fatores climáticos, a geração fotovoltaica possui características de intermitência, incerteza e variações na geração (PEREZ, 2015). Em sistemas de iluminação pública, a utilização da energia se dá nos horários em que não há luz solar, ou seja, a geração e consumo acontecem de forma alternada, quando há a presença de um o outro

se ausenta. Para suprir essa carência do sistema, faz-se necessária a utilização de acumuladores de energia, nesse caso, um banco de baterias.

As baterias se subdividem em dois grandes grupos relacionados à capacidade das mesmas de serem ou não recarregadas. No grupo primário encontram-se as baterias não recarregáveis, nas quais o processo de descarga acarreta em processos químicos irreversíveis. Já no grupo secundário a injeção de corrente faz com que se reverta o processo eletroquímico da descarga tornando assim estas baterias recarregáveis (PESQUERO, BUENO, *et al.*, 2008). Para a utilização em sistemas de iluminação pública, compulsoriamente deve-se utilizar baterias recarregáveis. Uma bateria recarregável é um dispositivo capaz de transformar energia elétrica em energia química, e vice-versa, armazenando a energia na forma química e fornecendo e recebendo energia na forma elétrica, através de reações eletroquímicas (ROSOLEM, BECK, *et al.*, 2012).

Existem inúmeros modelos de baterias e cada uma possui especificidades que definem quais são as mais adequadas para cada tipo de utilização. Em sistemas autônomos fotovoltaicos de iluminação alguns critérios devem ser observados, são esses:

- Capacidade de carga: Sombreamentos e mudanças na temperatura e irradiância impactam diretamente na produção de energia elétrica de um painel solar (PEREZ, 2015). Por isso, a bateria deve possibilitar a carga em valores de corrente dentro das faixas de produção de um painel solar. Quanto maior essa capacidade, mais rapidamente a bateria pode ser recarregada.
- Profundidade de descarga: A maioria das baterias necessita de alguma carga interna em todos os momentos. O número de ciclos de uma bateria está diretamente relacionado à profundidade das descargas aplicadas a mesma, quanto maior a profundidade da descarga, menor o número de ciclos (CARDOZO, 2016).
- Custo: O custo de um banco de baterias está relacionado ao preço por kWh, aos custos de manutenção ao longo da vida útil da bateria e ao número de ciclos que a bateria é capaz de prover.
- Impacto ambiental: A consciência ambiental é uma preocupação cada vez mais presente na concepção de sistemas de energia. O impacto ambiental causado pela fabricação, utilização ou descarte do banco de baterias também precisa ser considerado no projeto. Tendo em vista que uma das principais vantagens de sistemas solares fotovoltaicos se encontra no fato de ser uma energia não

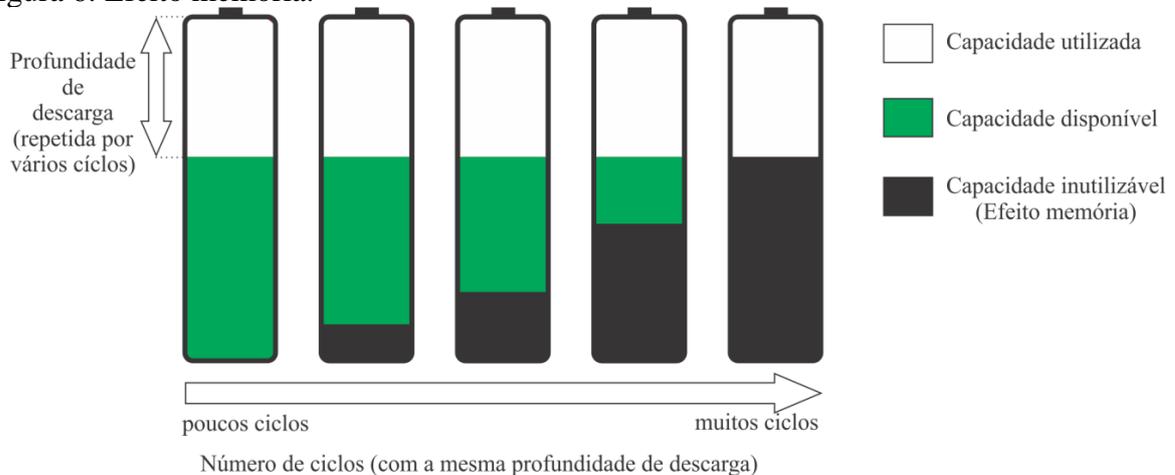
poluente, materiais como Chumbo e Cádmiio são altamente tóxicos ao meio ambiente quando descartados, fazendo com que o sistema perca a atratividade nesse parâmetro.

- **Segurança:** deve ser considerada pelo fato das baterias possuírem altas densidades de energia. Uma falha pode ocasionar transtornos e danificar a bateria e outros equipamentos, além de comprometer a segurança de terceiros.
- **Eficiência:** As conversões eletroquímicas que ocorrem no interior das baterias, bem como o armazenamento, fazem com que a mesma tenha perdas, seja por aquecimento, resistências internas, dentre outros fatores. Essa característica faz com que as baterias possuam índices de eficiência que correspondem ao quanto da energia armazenada na bateria, é repassada para a carga.
- **Efeito Memória:** Em alguns tipos de bateria pode ocorrer o efeito memória, o que não é desejável. Assim também nesse quesito devem ser analisadas as baterias a serem utilizadas em sistemas fotovoltaicos autônomos.

### 2.3.1 Efeito memória

O efeito memória é uma característica presente nas baterias secundárias e pode ser descrito como uma redução na capacidade de uma célula resultante de padrões repetitivos de uso (SATO, TAKEUCHI e KOBAYAKAWA, 2001). Assim, caso a bateria seja descarregada parcialmente ao mesmo nível por repetidas vezes, a capacidade da bateria ficará limitada a fração consumida anteriormente, como visto na Figura 6: Efeito memória.

Figura 6: Efeito memória.



Fonte: Adaptado de Sato (2001).

Esse efeito pode ser considerado irrelevante para sistemas em que ocorrem descargas profundas periódicas. Porém, os sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação pública podem apresentar vários dias com ciclos similares de carga e descarga. Além disso, descargas profundas programadas não podem ser aplicadas ao sistema, pois podem resultar em falta de energia devido a capacidade limitada de geração em alguns períodos. Dessa forma, para esse tipo de sistema faz-se necessária a utilização de baterias que não apresentem o efeito memória.

### 2.3.2 Tipos de baterias

Dentre as baterias secundárias, as mais comuns são: Chumbo Ácido, Níquel-Cádmio, Níquel-Hidreto-Metálico e Íons de Lítio (BATTERY-UNIVERSITY, 2017; PEREZ, 2015). Serão destacadas as especificações de cada uma das principais baterias, tendo em vista os critérios mencionados anteriormente. Dentre as baterias estudadas, as baterias a base de lítio apresentam maior conformidade com os critérios para a escolha da mesma e, devido a isso, será elaborada uma análise mais aprofundada dessa bateria.

#### 2.3.2.1 Chumbo Ácido

A bateria de Chumbo Ácido ( $\text{PbSO}_4$ ) é a mais popular, tendo sua utilização mais conhecida em veículos a combustão, como fonte auxiliar de energia. Predominantemente, as baterias licenciadas pelo INMETRO para geração fotovoltaica no Brasil são desse modelo (INMETRO, 2015).

A bateria de chumbo-ácido é constituída por dois eletrodos, um de chumbo esponjoso e outro de dióxido de chumbo em pó, ambos mergulhados numa solução de ácido sulfúrico dentro de uma malha de liga chumbo-antimônio (mais resistente à corrosão que o chumbo puro). Estas baterias são recarregadas por corrente contínua e o grau de carga da bateria é definido pela percentagem de ácido sulfúrico presente na mesma (MARCELINO, 2013).

A bateria estacionária de chumbo ácido (a qual apresenta as características desejadas em aplicações de sistemas fotovoltaicos) é uma bateria com baixo custo, com tecnologia bem desenvolvida e baixas taxas de auto descarga. Demandando, dessa maneira, pouca manutenção (BATTERY-UNIVERSITY, 2017; GARRIDO, 2010). As baterias de chumbo ácido não apresentam efeito memória.

Entretanto, essas baterias apresentam vida útil e número de ciclos inferiores a outros modelos de bateria, além de terem sua integridade comprometida ao serem submetidas a descargas profundas ou a temperaturas elevadas. A densidade de descarga desse banco de

baterias também é baixa, apresentando maior peso e volume para uma mesma capacidade de carga quando comparada a outras tecnologias. Deve-se considerar que a utilização de baterias que se utilizam de chumbo em sua composição acarreta em danos ambientais com o descarte do banco de baterias (BATTERY-UNIVERSITY, 2017; GARRIDO, 2010).

As baterias de chumbo ácido são uma excelente alternativa de baixo investimento financeiro para sistemas de *backup*, onde não será necessário um banco de baterias com potencial para suportar descargas profundas, uma vez que as mesmas são esporádicas. Para a utilização em sistemas fotovoltaicos de iluminação as baterias de chumbo não apresentam as melhores características dentro dos quesitos desejados para a utilização das mesmas.

#### 2.3.2.2 *Baterias a base de Níquel (Níquel-Cádmio (NiCd) e Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH):*

As baterias de níquel cádmio surgiram como uma alternativa às baterias de chumbo ácido. Possuem densidade de carga maior quando comparadas com sua antecessora, vindo a ser bastante difundida com o surgimento de tecnologias móveis como celulares e notebooks. Possuem um preço inicial maior que as baterias de chumbo, mas apresentam maior resistência a sobrecargas e temperaturas elevadas (GARRIDO, 2010). É uma tecnologia barata quando comparada às tecnologias mais recentes como Íons de lítio ou níquel hidreto metálico, porém apresentam uma vida útil inferior nessa mesma comparação. O principal fator para a não utilização das baterias de níquel cádmio é a presença do efeito memória. Além disso, o cádmio é muito poluente e a preocupação com a utilização desse material contribui para a utilização de outros tipos de baterias (DRESCH, 2010).

Já as baterias de níquel hidreto metálico são uma evolução das baterias de níquel cádmio, possuindo uma constituição muito semelhante (GARRIDO, 2010). Apresentam uma densidade de carga maior que as baterias de NiCd além de não possuírem materiais poluentes em sua composição. Esse modelo de bateria apresenta altas taxas de auto descarga. O efeito memória nessas baterias apresenta-se de forma mais discreta que nas baterias de níquel cádmio (BATTERY-UNIVERSITY, 2016).

#### 2.3.2.3 *Baterias de Lítio*

A bateria de lítio começou a ser estudada em 1913 por Gilbert Newton Lewis (LEWIS e KEYES, 1913). Devido a sua alta densidade de armazenamento, na década de 70 chegaram ao mercado as primeiras pilhas primárias de lítio através da empresa Sanyo (OZAWA, 2009). Já as baterias secundárias começaram a ser fabricadas pela empresa *Exxon Company*, em

1970, e pela empresa *Moli Energy* em 1980. Entretanto, ambas foram descontinuadas devido ao seu baixo número de ciclos. Em outra tentativa a empresa *Taridan* apresentou uma bateria com alta densidade, também descontinuada por questões de segurança (AIFANTIS, HACKNEY e KUMAR, 2010). Somente em 1991 a empresa *Sony* apresentou as baterias de íons de lítio, introduzindo-as ao mercado graças às melhorias com relação à segurança das mesmas (GOMES, 2012; LINDEN e REDDY, 2001; MINAMI, TATSUMISAGO, *et al.*, 2005; NISHI, 2001)

Essas baterias possuem metais óxidos contendo lítio no catodo e, geralmente, carbono grafite no anodo, sendo o eletrólito formado por sais de lítio dissolvidos em componentes orgânicos. Durante a carga, os átomos de lítio no catodo fluem para o anodo. Na descarga o fluxo reverso ocorre (BUCHHOLZ e STYCZYNSKI, 2014). As baterias de Lítio destacam-se para sistemas fotovoltaicos autônomos pela alta densidade e capacidade de carga. Outros fatores relevantes que se destacam como vantagens das baterias de lítio em relação às demais apresentadas são (BATTERY-UNIVERSITY, 2017; BUCHHOLZ e STYCZYNSKI, 2014; GOMES, 2012):

- Extensa vida útil;
- Elevado número de ciclos (3000 ciclos para uma profundidade de descarga de 80%);
- Livre de manutenção;
- Alta capacidade;
- Baixa resistência interna;
- Boa eficiência energética
- Algoritmo de carga simples;
- Tempos de carga razoavelmente curtos;
- Baixa auto descarga (menos da metade da NiCd e NiMH);
- Não apresenta efeito memória;

Como desvantagens, a principal preocupação é a segurança dessas baterias. Para aliviar isso, a mesma requer circuito de proteção e armazenamento sob condições adequadas de temperatura e tensão (BATTERY-UNIVERSITY, 2017; BUCHHOLZ e STYCZYNSKI, 2014).

Para efetuar a carga de baterias, muitos métodos são utilizados, dentre eles (CHEN, 2008; COPE e PODRAZHANSKY, 1999; LI, MURPHY e KOHL, 2001; HUA e LIN, 2000; YAU, LIANG e HSIEH, 2012):

- Método da Corrente Constante.
- Método da Tensão Constante.
- Método da Corrente Constante - Tensão Constante.
- Método de Impulsos de Corrente.
- Método de Carga Refletiva.

Entretanto, o método recomendado para baterias de lítio é o método da corrente constante – Tensão constante. Consiste em dividir o ciclo de carga em duas fases: a primeira aplica-se uma corrente constante no banco de baterias até que a tensão desejada seja atingida, após isso, na segunda fase se aplica uma tensão constante no mesmo (HUA e LIN, 2000). A utilização desse método para baterias de lítio resulta em tempos reduzidos de carga, além de prevenir sobrecargas do sistema (SIKHA, RAMADASS, *et al.*, 2003).

#### 2.4 CARGA - LÂMPADA LED

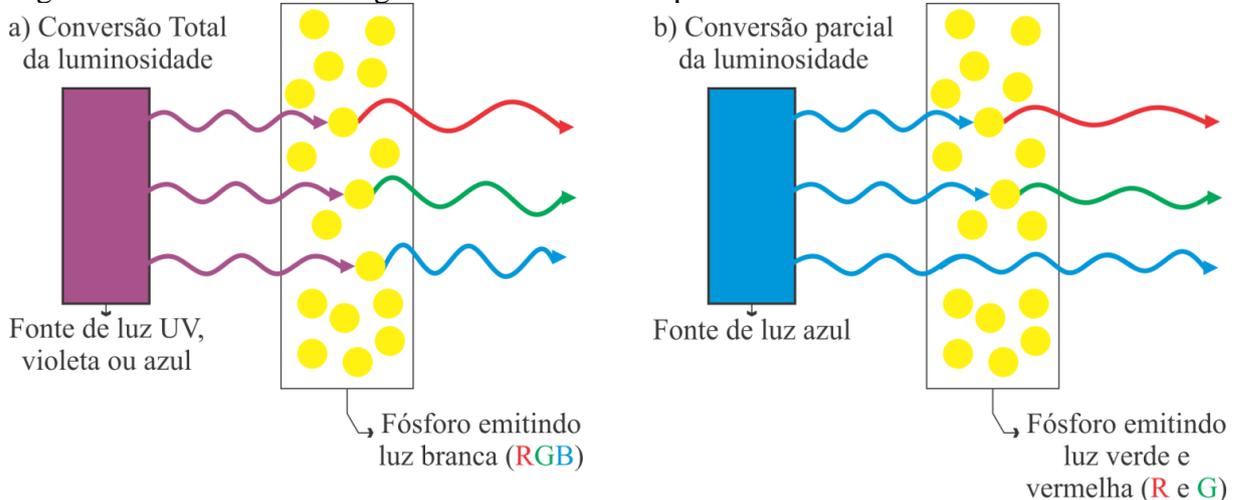
Em 1907 o princípio da eletroluminescência foi descoberto por Henry Joseph Round, quando o mesmo notou emissão de luz ao aplicar uma diferença de potencial elétrico em um cristal de Carbetto de Silício (SiC) (SCHUBERT, 2006). Utilizando-se do princípio da eletroluminescência, em 1962 foi desenvolvido o primeiro diodo emissor de luz (Light Emitting Diode – LED) (BULLOUGH, 2003; STEIGERWALD, BHAT, *et al.*, 2012).

Uma das vantagens da utilização de LEDs é a possibilidade de emitir luz em várias faixas do espectro de radiação. Apesar da luz emitida pelo LED estar relacionada apenas a um comprimento de onda, a emissão em uma faixa maior do espectro é conseguida ao variar os elementos químicos utilizados para efetuar a dopagem do cristal de silício, que podem ser gálio, alumínio, arsênio, fósforo, índio e nitrogênio (CERVI, 2005). Os tons vermelho, laranja e amarelo são obtidos por LEDs que utilizam os compostos AlGaInP (alumínio gálio índio fosfeto). Já os tons verde e azul são obtidos pelos compostos InGaN (índio gálio nitrito) (BULLOUGH, 2003). LEDs AlGaInP de alta eficiência foram desenvolvidos a partir dos anos 1980, já LEDs GaInN na década de 1990 (CHO, PARK, *et al.*, 2017).

Para obter a luz branca, podem ser utilizadas algumas técnicas. A primeira técnica consiste na utilização de LEDs coloridos, vermelho, verde e azul, conhecidos como RGB (do inglês *red*, *green* e *blue*) (CHO, PARK, *et al.*, 2017). Estes LEDs conseguem atingir várias cores dentro da faixa variando-se as correntes e, conseqüentemente, as intensidades relativas de cada elemento R, G e B. A segunda técnica consiste na utilização de um LED ultravioleta

ou violeta recoberto de fósforo similar ao processo de lâmpadas fluorescentes, que foi apresentado inúmeras vezes antes do surgimento de LEDs azuis. Ainda utilizando das propriedades do fósforo de alterar o comprimento de onda (BLASSE e BRIL, 2004) e com o surgimento dos LEDs azuis a base de nitreto de gálio (GaN), desenvolveu-se a terceira técnica de obtenção de luz branca. Similarmente à segunda técnica, esta utiliza fósforo para converter a luz proveniente do LED, porém, aqui o LED utilizado é azul, aumentando assim o rendimento do sistema. Uma vez que, para LEDs ultravioletas toda luz necessita ser convertida. Enquanto para LEDs azuis, apenas a parcela correspondente às cores vermelho e verde (CHO, PARK, *et al.*, 2017), como pode ser observado na Figura 7.

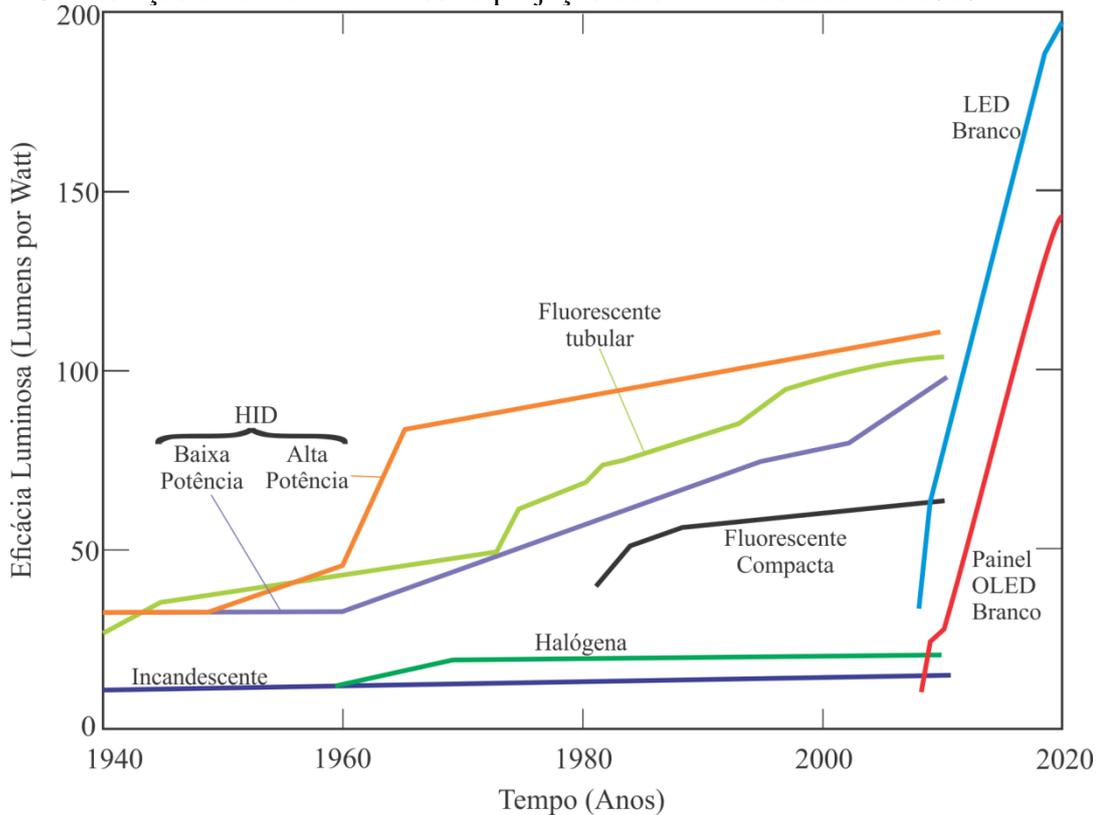
Figura 7: Conversão de energia de LEDs brancos a partir de LEDs azuis ou UV.



Fonte: (CHO, PARK, *et al.*, 2017) adaptado.

Inicialmente, os LEDs eram utilizados apenas para fins de iluminação indicativa, ampliando suas aplicações com o surgimento do LED de alto brilho. O primeiro LED de potência comercial surgiu no ano de 1998, impactando diretamente no desenvolvimento de sistemas de iluminação (STEIGERWALD, BHAT, *et al.*, 2012). Desde então, o LED vem apresentando uma rápida evolução na eficácia luminosa, atingindo valores superiores a 200lm/W em 2014 (CHO, PARK, *et al.*, 2017). Essa evolução pode ser observada na Figura 8 quando comparada a outras fontes luminosas.

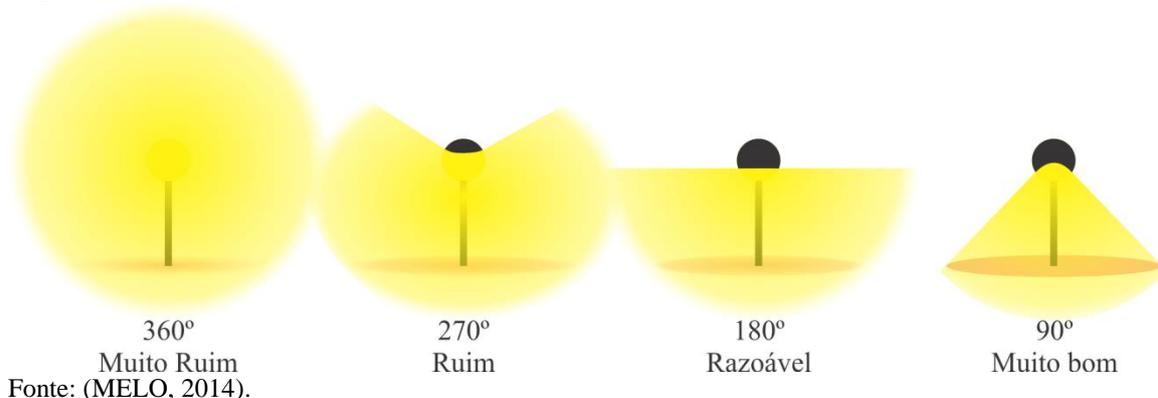
Figura 8: Evolução da eficácia luminosa e projeção da eficácia do LED até 2020.



Fonte: (EVANCZUK, 2012) adaptado.

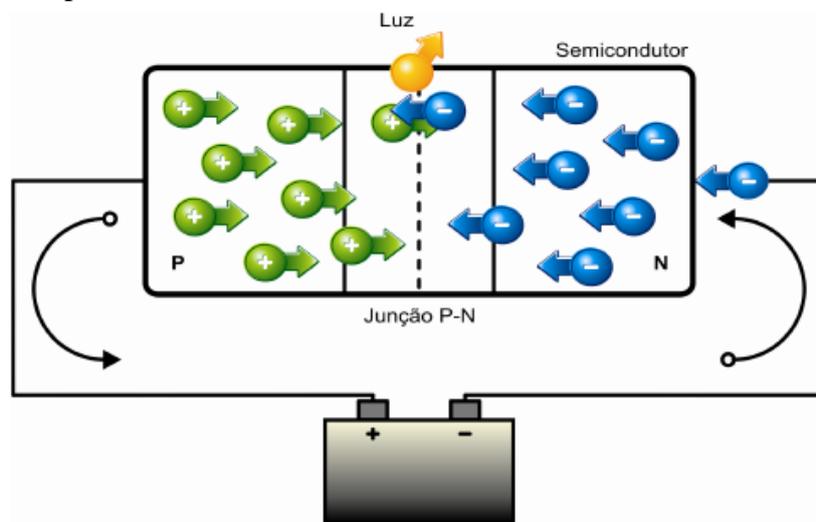
Além da elevada eficácia luminosa, o feixe de luz emitido pela lâmpada LED pode ser direcionado, já que esta possui um ângulo de radiação de 20 a 150° para LEDs de alto brilho e potência (MELO, 2014). Isso propicia que a luz seja direcionada ao ponto em que se deseja iluminar, evitando emissão para direções indesejadas conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Emissão direcionada de luz.



O LED é composto por dois materiais que formam uma junção P-N tal qual o painel fotovoltaico. O que diferencia painéis solares de LEDs é a sua utilização: enquanto um absorve fótons e transforma em energia elétrica, o outro transforma energia em fótons. As características construtivas de cada um diferenciam-se visando aperfeiçoar a sua utilização. Quando esses lados são polarizados diretamente, ocorre a emissão de fótons como pode ser observado na Figura 10 (BULLOUGH, 2003).

Figura 10: Princípio de funcionamento de um LED.

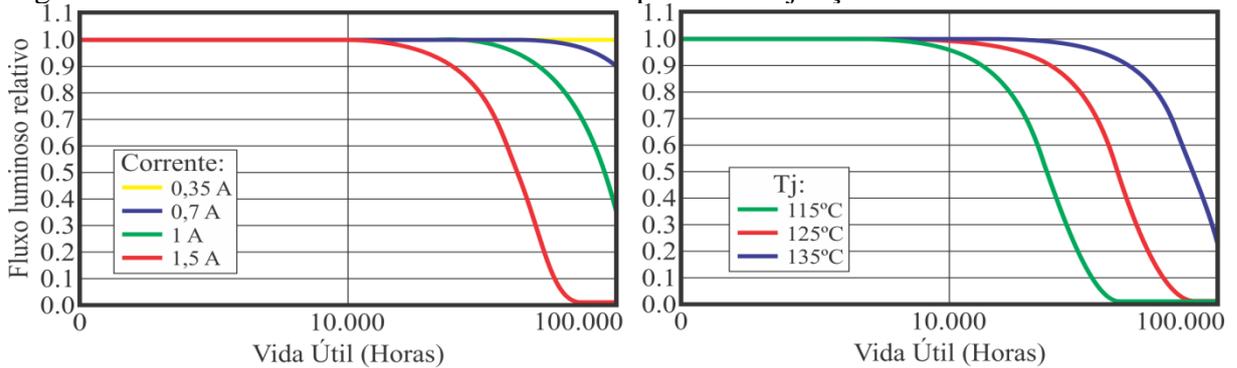


Fonte: (PINTO, 2012).

No contexto de sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação, a iluminação à LED traz inúmeras vantagens ao sistema. Já é difundida na literatura a integração entre painéis solares e lâmpadas LED para iluminação pública (BECHERIF, AYAD, *et al.*, 2010; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; FEMIA e ZAMBONI, 2012; MELO, 2014). A elevada vida útil, elevada eficácia luminosa e a possibilidade de iluminação direcionada das lâmpadas LED torna as mesmas atrativas para utilização em iluminação (MELO, 2014). Além disso, a alimentação das mesmas ocorre em corrente contínua de baixa tensão, o que possibilita a otimização dos conversores, dispensando a utilização de um inversor no sistema e reduzindo consequentemente o custo. (DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010).

A vida útil das lâmpadas LED tem dependência direta da temperatura de junção e corrente de operação do mesmo, conforme pode ser observado na Figura 11 (BENDER, 2012). Quando projetado adequadamente, consegue cerca de 50.000 horas de funcionamento (PINTO, 2012), o que faz com que essa lâmpada apresente pouca manutenção e represente baixo impacto ambiental. A elevada eficácia dos LEDs possibilita menor capacidade de geração e armazenamento.

Figura 11: Influência da Corrente direta e da temperatura de junção na vida útil dos LEDs



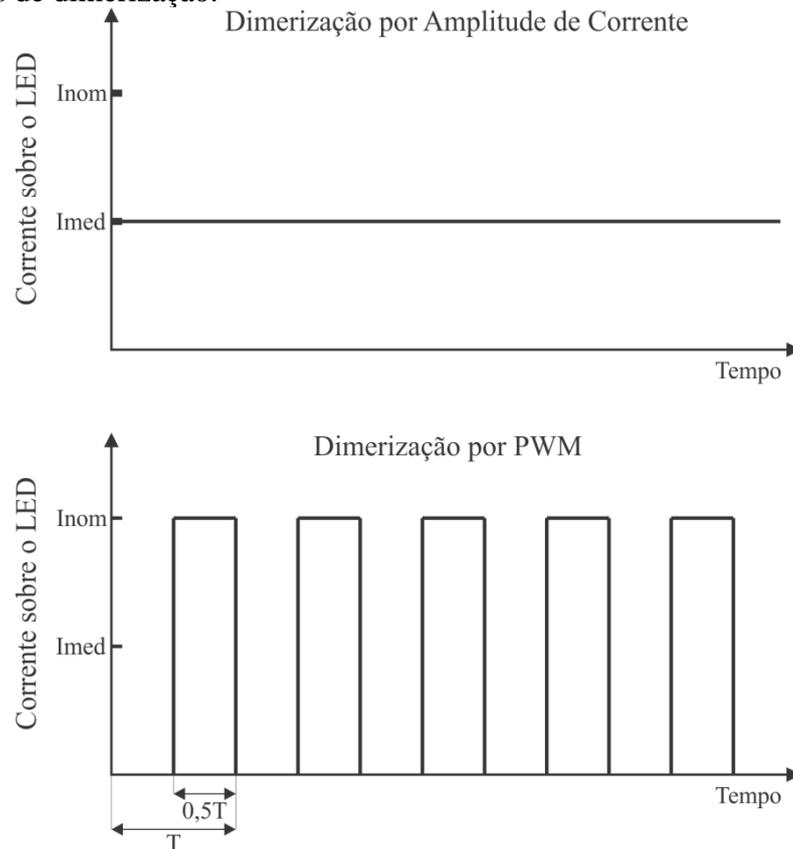
Fonte: (PHILIPS-LUMILEDS, 2009) adaptado.

#### 2.4.1 Dimerização

A dimerização consiste na variação do fluxo luminoso. Este sendo reduzido diminui a potência utilizada pela luminária, economizando energia (CHIU, LO, *et al.*, 2009). Uma das mais valiosas características de lâmpadas LED é a sua capacidade de dimerização (VAQUERO, 2013). Para sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação a dimerização possibilita que o dimensionamento seja feito de forma mais racional, quando o custo é um fator determinante. Ao dimerizar o sistema, pode-se incluir um banco de baterias menor e/ou garantir energia por maior tempo, mesmo que isso acarrete em menor iluminação em determinados períodos.

Existem inúmeras técnicas de dimerização sendo as mais convencionais a modulação da amplitude (Amplitude Modulation – AM) da corrente dos LEDs e a modulação da largura de pulso (do inglês *Pulse Width Modulation* - PWM) de acionamento do driver de alimentação dos LEDs (LUN, LOO, *et al.*, 2009; MOREIRA, 2009; VAQUERO, 2013). Enquanto a dimerização por AM varia linearmente o valor da amplitude da corrente contínua, a dimerização PWM impõe ao LED uma onda quadrada com variação na razão cíclica. Na Figura 12 são representadas ambas as técnicas (para esse caso, as duas possuem a mesma corrente média no LED).

Figura 12: Métodos de dimerização.



Fonte: (LUN, LOO, *et al.*, 2009) adaptado.

#### 2.4.1.1 Dimerização por PWM

Por possuir rápida resposta à corrente oriunda do Driver, os LEDs podem ser dimerizados por PWM (LUN, LOO, *et al.*, 2009). Conforme pode ser observado na Figura 12, a corrente é alternada periodicamente entre o nível nominal e zero, de modo que a corrente média esteja no valor desejado. A corrente de dimerização no LED ( $I_{LED}$ ) pode ser definida a partir do ciclo de trabalho ( $D$ ) e da corrente nominal ( $I_{nom}$ ) (LUN, LOO, *et al.*, 2009; VAQUERO, 2013).

$$I_{LED} = D \cdot I_{nom} \quad (2)$$

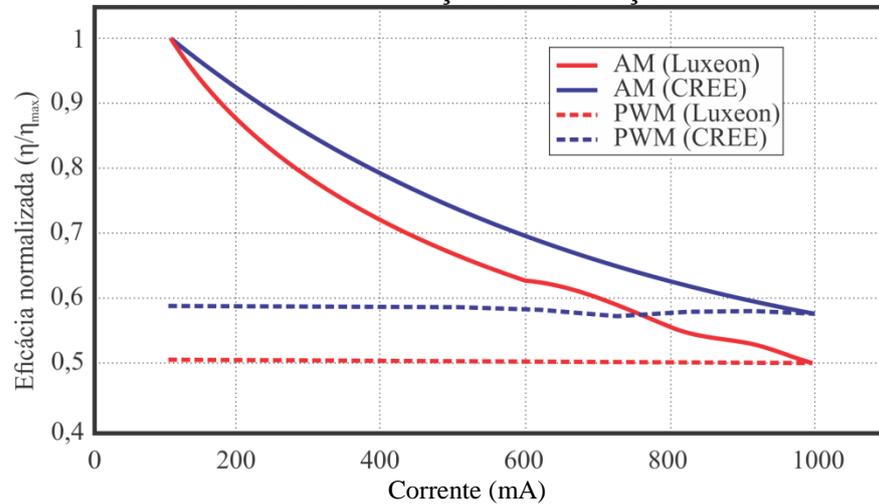
O ciclo de trabalho ( $D$ ) representa a relação entre o tempo de um período ( $T$ ) e o tempo em que a corrente se encontra no valor nominal ( $t_{on}$ ).

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (3)$$

O controle por PWM apresenta melhor cromaticidade da luz e flexibilidade de implementação, por outro lado a eficácia luminosa permanece constante nesse método de

dimerização (LUN, LOO, *et al.*, 2009; VAQUERO, 2013). A relação entre os métodos de dimerização e a eficácia luminosa pode ser observada na Figura 13.

Figura 13: Eficácia luminosa normalizada em relação à dimerização.

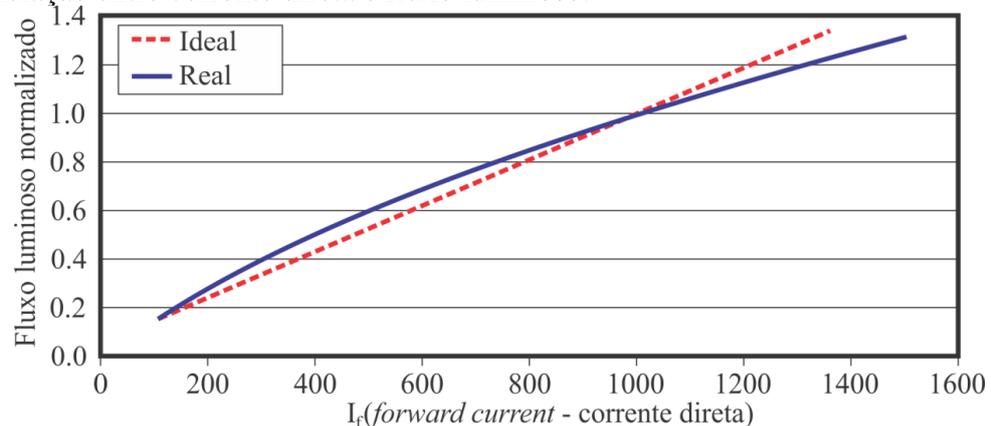


Fonte: (LUN, LOO, *et al.*, 2009) adaptado.

#### 2.4.1.2 Dimerização por modulação da amplitude da corrente

Esta é a técnica mais simples de dimerização, baseada na relação quase linear entre a corrente de alimentação dos LEDs e o fluxo luminoso, apresentado na Figura 14 (VAQUERO, 2013). Nela o fluxo luminoso acompanha a variação da corrente que alimenta os LEDs, sendo essa corrente constante e inferior à nominal. A dimerização por amplitude de corrente tem como principais desvantagens a limitação a um mínimo de dimerização predefinido em 10% da corrente nominal (dimerizações abaixo de 10% são difíceis) (DYBLE, NARENDRAN, *et al.*, 2005). Além disso, a cromaticidade do LED é sensivelmente alterada (DYBLE, NARENDRAN, *et al.*, 2005).

Figura 14: Relação entre corrente direta e fluxo luminoso.



Fonte: (VAQUERO, 2013) adaptado.

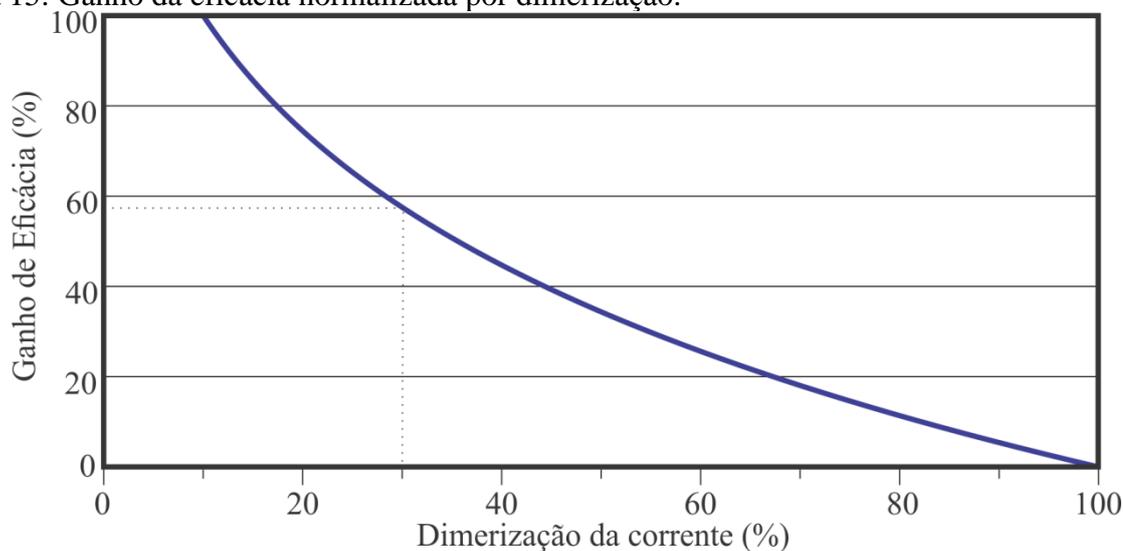
A partir da relação do fluxo luminoso normalizado por (LUN, LOO, *et al.*, 2009) em relação à corrente aplicada ao LED (demonstrada na Figura 13), pode-se afirmar que com a dimerização por modulação de amplitude o LED apresenta maior fluxo luminoso por unidade de corrente para o circuito dimerizado. Esta é uma vantagem significativa para um sistema autônomo de iluminação, pois, mesmo que não seja desejada, a dimerização faz-se necessária para garantir fornecimento em períodos de baixa geração.

#### 2.4.1.3 Efeito Droop,

A relação anteriormente apresentada entre a corrente aplicada nos LEDs e o fluxo luminoso quando o sistema é dimerizado por amplitude de corrente é conhecida como Efeito Droop (LUN, LOO, *et al.*, 2009; VAQUERO, 2013). O Efeito Droop é um dos limitantes da corrente dos LEDs, uma vez que o aumento da corrente aplicada sobre o LED diminui significativamente sua eficácia (DYBLE, NARENDRAN, *et al.*, 2005).

Por outro lado, essa característica é vantajosa quando é realizada a dimerização do LED. A diminuição da amplitude da corrente acarreta no aumento relativo da eficácia, com isso a dimerização da corrente traz uma dimerização menor da luminosidade (STOUCH-LIGHTING, 2017). O ganho de eficácia por nível de dimerização é apresentado na Figura 15. Nesta figura é destacado um ganho que varia de 0%, quando não dimerizado, a mais de 50%, quando dimerizado a 30% da potência nominal. Essa análise é realizada com temperatura de junção constante, caso fosse analisada a diminuição da temperatura de junção em função da dimerização o ganho de eficácia do LED seria ainda maior.

Figura 15: Ganho da eficácia normalizada por dimerização.

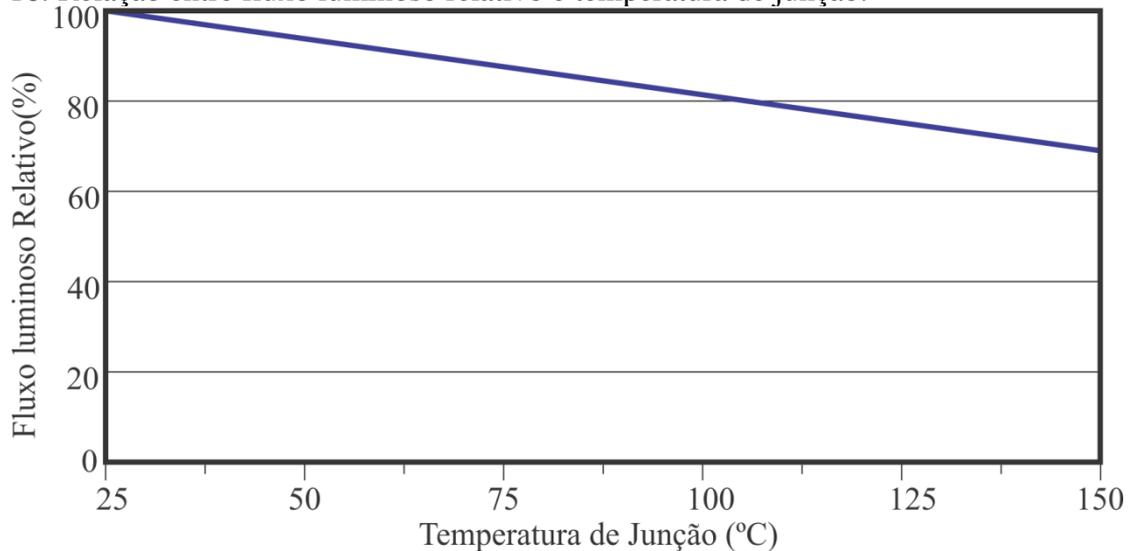


Fonte: (LUN, LOO, *et al.*, 2009) adaptado.

#### 2.4.1.4 Temperatura de junção

A energia elétrica que alimenta uma fonte de luz é convertida em energia radiante e energia térmica. O LED converte uma parcela significativa de sua energia em calor (BENDER, 2012). Na Figura 16 observa-se que o fluxo luminoso relativo é inversamente proporcional à temperatura de junção. Assim, a eficácia do sistema aumenta para menores temperaturas de junção.

Figura 16: Relação entre fluxo luminoso relativo e temperatura de junção.



Fonte: (BENDER, 2012).

Como a temperatura de junção possui relação direta à corrente injetada no LED, a dimerização da corrente diminuirá a temperatura de junção aumentando a eficácia do LED. Assim, com a dimerização por modulação de amplitude da corrente tem-se um aumento da eficácia pelo Efeito *Droop* e pela temperatura de junção, fazendo com que o sistema dimerizado apresente uma melhora na eficácia do LED.

## 2.5 CONCLUSÃO

A configuração unidirecional em série é recomendada para sistemas solares fotovoltaicos autônomos, pois a geração e o consumo ocorrem em períodos alternados. Os conversores utilizados, tanto para carga da bateria quanto para a alimentação da luminária, devem ser eficientes de forma a transmitir o máximo possível de energia. Assim como os materiais utilizados como fonte, carga e acumulador de energia devem ser dimensionados e configurados para possibilitar o melhor aproveitamento da energia com menor custo possível.

No painel solar fotovoltaico é preciso analisar o MPPT, sendo importante ter o rastreamento desse ponto para garantir o melhor aproveitamento da utilização do painel. O rastreamento pode ser realizado pelas mais variadas técnicas, apresentadas nesse capítulo. Já na instalação é preciso analisar a angulação do painel solar, sendo que sistemas solares conectados à rede de distribuição utilizam um ângulo diferente de sistemas autônomos. Esses últimos, por sua vez, devem observar os períodos críticos de radiação solar para garantir que seja realizada a maior geração possível.

O banco de baterias é um ponto crítico do sistema por ser o mais oneroso e com menor tempo de vida útil quando comparado aos demais apresentados. Devido a isso, vários requisitos foram considerados para a escolha da bateria. Dentre as baterias mais utilizadas (chumbo, níquel e lítio) as baterias de lítio apresentaram ampla vantagem em relação às demais, minimizando as desvantagens do banco de baterias para o sistema a um bom custo em longo prazo além de não apresentar efeito memória, tendo apenas que ser observada a segurança desse tipo de bateria. Para mitigar a probabilidade de falhas do banco de baterias, o mesmo deve possuir um circuito de proteção e a carga deve ser feita seguindo a técnica da corrente constante – tensão constante.

A iluminação a LED é a melhor opção para utilização em iluminação pública. Possuem eficácia luminosa superior a outras tecnologias emitindo um feixe de luz direcionável em ampla faixa do espectro visível e possibilitam a utilização de conversores eficientes, sem a necessidade de um inversor. Outro fator relevante é a elevada vida útil dos LEDs, o que torna atrativo seu custo em longo prazo. Para garantir o bom funcionamento dos LEDs deve ser observada a corrente aplicada a esses e a temperatura dos mesmos, devendo bons sistemas de dissipação de calor serem acoplados para tal fim.

Especificamente para sistemas autônomos de iluminação pública, a possibilidade de dimerização dos LEDs é um fator crucial para garantir a iluminação em longos períodos com pouca geração sem a utilização de um banco de baterias muito grande para tal. Dentre os processos de dimerização mais comuns, a modulação de amplitude de corrente é recomendada por apresentar uma melhora na eficácia luminosa quando comparada com a estratégia de modulação PWM.

### 3 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO FOTOVOLTAICO BASEADO NAS MÉDIAS MENSAS E ANUAIS

Este capítulo apresenta um método, já difundido na bibliografia, de dimensionamento do painel solar e do banco de baterias de um sistema fotovoltaico autônomo de iluminação pública, baseado nas médias mensais de radiação solar e anuais de utilização da carga para definir a produção e geração de energia.

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será adaptada para dimensionamento de um sistema de iluminação a metodologia tradicionalmente adotada para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos em geral. Essa metodologia, difundida na bibliografia (CEPEL-CRESESB, 2014; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; IMHOFF, 2007), é utilizada no dimensionamento em grande parte do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos, inclusive em alguns softwares de dimensionamento (LABSOL, 2017).

A primeira parte do capítulo tratará do estudo das perdas do sistema, para assim obter o rendimento do sistema como um todo, possibilitando o dimensionamento dos painéis e da bateria de forma mais próxima ao real.

A determinação do consumo será realizada a partir da análise da variabilidade das horas de noite ao longo do ano. Para servir como base no dimensionamento será escolhida como número de horas de noite a média do pior mês do ano e uma luminária LED.

Por fim, os cálculos para dimensionamento dos painéis solares e do banco de baterias são apresentados a seguir.

#### 3.2 RENDIMENTO DO SISTEMA

Para dimensionar um sistema fotovoltaicos autônomo com maior precisão, é preciso considerar o rendimento do sistema ( $\eta$ ). Esse rendimento é cumulativo à geração, armazenamento, transmissão e conversão da energia para o banco de baterias e para carga ( $\eta_{\text{driver}}$ ) (FREITAS, 2008). O rendimento total do sistema pode ser definido pelo produto dos rendimentos específicos de cada componente do sistema, são eles:

- Rendimento da geração ( $\eta_{\text{PV}}$ ): As perdas na geração do sistema correspondem ao rendimento do painel, considerando que o mesmo não trabalhará no ponto

de máxima potência todo o tempo (FREITAS, 2008). São considerados quando a técnica de rastreamento de máxima potência não é precisa. Entretanto para esse dimensionamento o rendimento será desconsiderado uma vez que são conhecidas técnicas rápidas e eficientes de rastreamento de MPPT, apresentadas no capítulo 2 (IMHOFF, 2007).

- Rendimento no armazenamento ( $\eta_{\text{Bat}}$ ): O rendimento do banco de baterias utilizado para esse cálculo é de 95% (CEPEL-CRESESB, 2014), considerando a utilização de baterias de íons de lítio (BUCHHOLZ e STYCZYNSKI, 2014).
- Rendimento na transmissão ( $\eta_{\text{cab}}$ ): As perdas de transmissão são encontradas a partir da resistência ôhmica dos condutores. O projetista deve pensar considerar uma perda entre 1% e 3% (CEPEL-CRESESB, 2014), assim o rendimento de transmissão considerado nos cálculos será de 98%. Para definir a seção dos condutores utiliza-se a seguinte equação.

$$S(\text{mm}^2) = \rho \left( \frac{\Omega \cdot \text{mm}^1}{\text{m}} \right) \times \frac{d(\text{m}) \times I(\text{A})}{\Delta V(\text{V})} \quad (4)$$

Onde:

$\rho$  – resistividade do material do condutor. Comumente cobre ( $0,01724\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )

$d$  – comprimento do condutor.

$I$  – corrente que passa pelo condutor

$\Delta V$  – queda de tensão tolerada no cabeamento.

- Rendimento no carregador de baterias ( $\eta_{\text{car}}$ ): o carregador de baterias consiste em um conversor CC-CC, com rastreamento de MPP. O rendimento considerado será de 86% (DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010).

Assim o rendimento total considerado do sistema será, aproximadamente, 80%.

$$\eta = 1 * 0,95 * 0,98 * 0,86 \cong 0,80 \quad (5)$$

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO

O projeto de um sistema fotovoltaicos autônomo consiste em dimensionar a geração e o armazenamento para suprir a energia demandada pela carga. Para tal é necessário ter conhecimento da carga do sistema bem como do comportamento da mesma (IMHOFF, 2007). A carga considerada nesse dimensionamento é propriamente uma luminária LED padrão de iluminação pública de 60W, cujas características (obtidas com temperatura de superfície do LED de 85°C) podem ser observadas na Tabela 3 (ZAGONEL, 2017).

Tabela 3: Parâmetros da luminária Zagonel ZL49 de 60W.

Parâmetro	Valor
Modelo	ZL4900
Fluxo Luminoso	6000 Lúmens
Ângulo de Irradiação	80°x140°
Temperatura de Cor	5.000K

Fonte: (ZAGONEL, 2017).

Para dimensionar um sistema de iluminação adequadamente, deve-se considerar a localização em que o sistema será instalado. Nesse dimensionamento será considerada a localização do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). As coordenadas do local são latitude -29.713178 e longitude -53.716785. Por ser localizada numa região subtropical, há uma variação significativa das horas de noite no decorrer do ano.

As equações apresentadas a seguir são utilizadas para determinar a variação das horas de dia ( $T_d$ ), para então determinar as horas de noite ( $T_n$ ) de cada dia do ano ( $dn$ ), onde  $dn$  representa o número do dia de interesse no ano (sendo 1 para 1º/jan. e 365 para 31/dez.) (BORGES, 2016).

$$T_d = \frac{2}{5} \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (6)$$

$$T_n(dn) = 24 - T_d(dn) \quad (7)$$

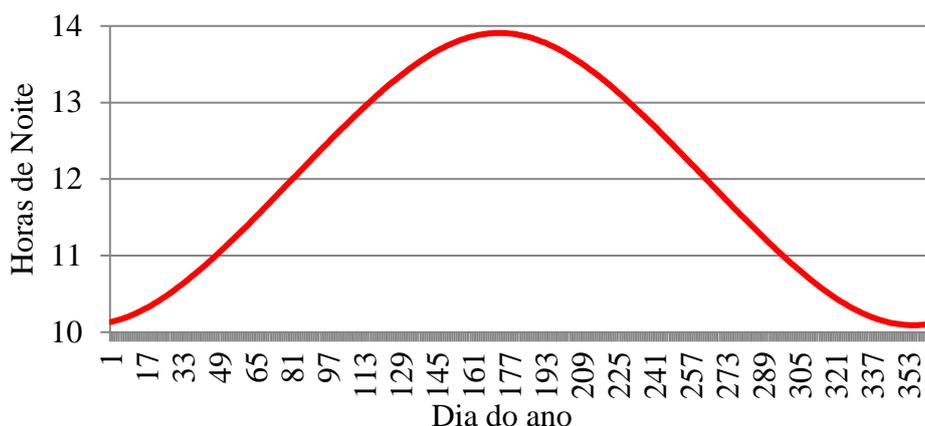
Onde:

- $\phi$  é a latitude do local desejado. A tangente é negativa para o hemisfério sul e positiva para o hemisfério norte.
- $\delta$  é a declinação da terra, definida por:

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left( \frac{360}{365} (284 - dn) \right) \quad (8)$$

A variação das horas no decorrer do ano para a cidade de Santa Maria/RS é apresentada na Figura 17. Observa-se que as horas de autonomia do sistema variam durante o ano de aproximadamente 10 horas e 5 minutos no solstício de verão a 13 horas e 56 minutos no solstício de inverno. Assim, além da produção ser menor para o inverno devido a menor radiação, o consumo é aproximadamente 30% maior que no solstício de verão.

Figura 17: Variação das horas de noite no período de 1 ano.



Fonte: Autor.

A partir dessa análise proposta, obtém-se o valor de consumo para cada dia, que é empregado para o dimensionamento da carga. Para dimensionamentos onde não é considerada a variação da carga ao longo do ano (CEPEL-CRESESB, 2014; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; IMHOFF, 2007; SEGUEL, 2009), utiliza-se um valor fixo (normalmente a média de 12 horas). Há imprecisão nos resultados, principalmente em locais com latitudes altas.

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico tradicionalmente utilizado, o valor de horas considerado pode ser determinado pela média mensal no período mais crítico do ano: os 30 dias mais próximos ao solstício de inverno. Assim, o sistema possuirá maior confiabilidade, ao custo de um superdimensionamento no verão. Neste período o valor de horas com a lâmpada acesa será de 13h e 54 minutos.

$$\text{Consumo (Wh)} = \text{Horas de funcionamento (h)} * \text{Potência da lâmpada (W)} \quad (9)$$

### 3.4 PROJETO E DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

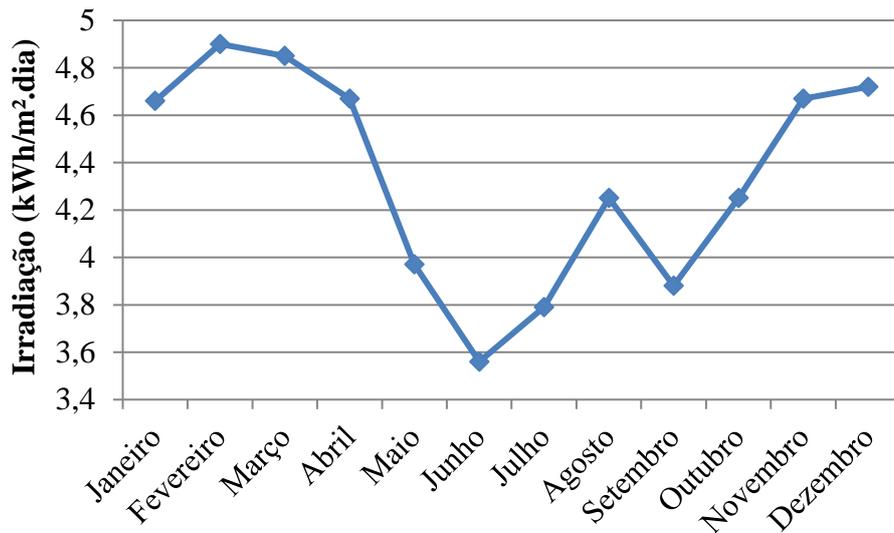
A tensão dos painéis solares encontrados comercialmente gira em torno de 35V e sua potência varia de 260-345Wp por painel (CANADIAN, 2017; RISEN, 2018). Os painéis podem ser associados em série ou paralelo visando aumentar sua corrente ou tensão, conforme desejado. O bom dimensionamento dos painéis depende principalmente dos níveis de radiação na localidade, consumo de energia do sistema e das perdas.

#### 3.4.1 Níveis de radiação solar

O conhecimento dos índices de incidência solar é imprescindível para o projeto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico. A posição do Sol ao longo do ano em relação a

um ponto da superfície terrestre define a capacidade de geração dos painéis solares, bem como a posição ideal de instalação do painel. Conforme apresentado no capítulo 2, com auxílio do software SUNDATA, o melhor ângulo de instalação de um painel solar para sistemas autônomos instalados na cidade de Santa Maria/RS é de 50°, assim o maior valor mínimo de radiação média mensal de 3,56 kWh/m<sup>2</sup>.dia é encontrado.

Figura 18: Radiação média mensal em Santa Maria para um ângulo de 50°.

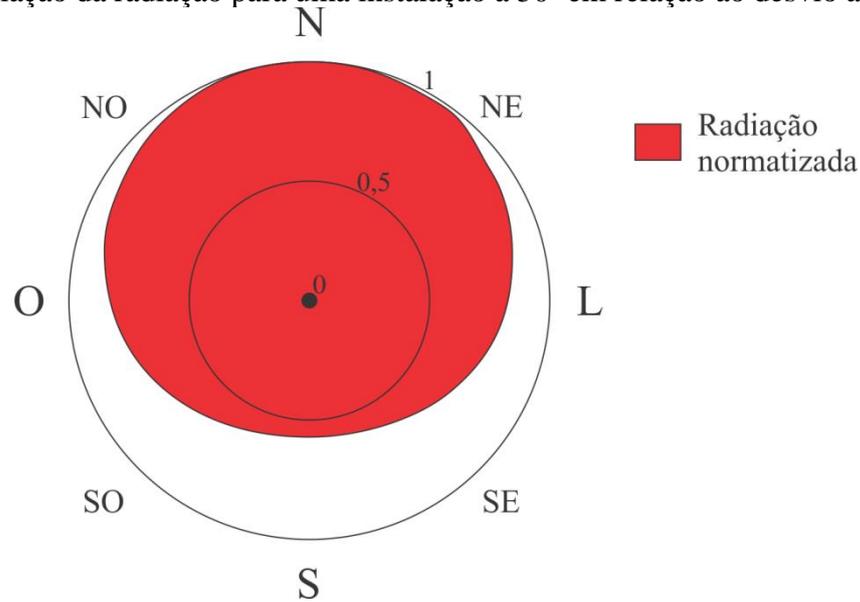


Fonte: (CEPEL-CRESESB, 2017).

É válido ressaltar que os valores da Figura 18 consideram sempre o norte geográfico como referência. Assim, estes valores são relativos a sistemas direcionados para o norte geográfico (CEPEL-CRESESB, 2017). Alguns projetos autônomos possuem estrutura de instalação já presente como, por exemplo, residências que utilizam o telhado como ponto de instalação. Estas nem sempre se encontram voltadas para o norte geográfico o que causa alteração do nível de radiação fornecido pelo software SUNDATA. Entretanto, para sistemas de iluminação será considerado que a instalação dos painéis se dê sempre para o norte geográfico.

Uma representação da influência da direção de instalação é apresentada na Figura 19, onde é possível observar que a instalação direcionada ao norte geográfico possui maior aproveitamento da energia em Santa Maria/RS. Para plotar o gráfico apresentado na Figura 19 foi utilizado o software Radasol 2 (LABSOL, 2017), que também auxiliou nos cálculos das médias de produção no período de um ano para cada ângulo de desvio azimutal.

Figura 19: Variação da radiação para uma instalação a 50° em relação ao desvio azimutal.



Fonte: (LABSOL, 2017).

Mesmo a um ângulo de 50° e direcionado para o norte, o período com menores índices de produção ocorre nos meses de Junho e Julho. Assim, para o projeto dos painéis fotovoltaicos será considerada a capacidade de geração diária de 3,56 kWh/m<sup>2</sup>.

### 3.4.2 Dimensionamento dos painéis

Tendo em mãos os valores de radiação, consumo e rendimento do sistema, calcula-se a capacidade de geração necessária para o mês com maior consumo e menores índices de geração (IMHOFF, 2007; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; FREITAS, 2008). Para determinar o consumo corrigido do sistema, o consumo calculado deve ser dividido pelo rendimento do sistema.

$$\text{Consumo Corrigido (Wh)} = \frac{\text{Consumo(Wh)}}{\eta_{PV} * \eta_{Bat} * \eta_{cab} * \eta_{car}} \quad (10)$$

Para determinar a produção de cada módulo é considerado o total de energia acumulado ao longo do dia. Uma forma comum de determinar esse valor é transformar o mesmo em horas de Sol Pleno. Para tal, se determina o valor equivalente de horas de radiação igual a 1kW/m<sup>2</sup> (CEPEL-CRESESB, 2014). O valor de horas de Sol Pleno é determinado por:

$$SP(h) = \frac{\text{Radiação diária} \left( \frac{kWh}{m^2} \right)}{1 \left( \frac{kWh}{m^2} \right)} \quad (11)$$

Assim determina-se a potência de painéis necessária.

$$Potência\ Necessária\ (Wp) = \frac{Consumo\ Corrigido\ (Wh)}{SP\ (h)} \quad (12)$$

Em condições reais de funcionamento, o painel solar não apresentará as características do *datasheet*, uma vez que pode haver acúmulo de poeira, degradação ao longo do tempo, dentre outros fatores (IMHOFF, 2007). Assim utiliza-se o fator de correção do painel (FCP) de 90% para módulos cristalinos, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Fator de correção dos módulos fotovoltaicos.

Tipo de módulo	Fator de correção
Cristalino	0,9
Amorfo	0,7

Fonte: (IMHOFF, 2007).

Assim obtém-se a potência corrigida de painéis:

$$Potência\ Corrigida\ (Wp) = Potencia\ Necessária\ \frac{(Wp)}{FCP} \quad (13)$$

Portanto, a partir desse método de dimensionamento (CEPEL-CRESESB, 2014; DALLA COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010; IMHOFF, 2007), obtém-se de forma rápida e simplificada a potência de geração necessária para o sistema.

### 3.5 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

O dimensionamento do banco de baterias é proporcional a quanta carga deve ser armazenada e a autonomia desejada para o sistema. A autonomia apresentada comercialmente no Brasil é de 36 horas (ECOEFIICIENTES, 2017; ECOFORCE, 2017; JOVIC, 2017; NEOSOLAR, 2017). Tendo em vista que se consideram o consumo como 12 horas por noite (que é a média anual), isso denota 3 dias de autonomia. Assim, emprega-se a seguinte equação para determinar a autonomia do sistema.

$$Autonomia = Horas\ diárias * número\ de\ dias \quad (14)$$

Em posse da autonomia, calcula-se a capacidade do banco de baterias necessária para o sistema. Essa é obtida a partir do cálculo do consumo do sistema e da autonomia desejada, dividindo a mesma pela profundidade de descarga máxima aceita pelo banco de baterias.

$$Capacidade\ das\ baterias = \frac{\frac{Consumo}{\eta_{Bat} * \eta_{cab}} * Autonomia}{Profundidade\ de\ descarga} \quad (15)$$

### 3.6 CONCLUSÃO

Nesse capítulo o estudo do rendimento do sistema demonstrou que apenas 80% da energia gerada é aproveitada pela luminária. Desse modo, os cálculos de dimensionamento precisam ser avaliados considerando o fator de rendimento do sistema, evitando assim subdimensionamento do mesmo.

O consumo de sistemas de iluminação pública apresenta variabilidade no decorrer do ano, sendo que foi observado que os períodos com maior necessidade de carga coincidem com os períodos de menores taxas de radiação solar. Com isso o dimensionamento do sistema deve de ser executado visando o período crítico, onde há mais horas noturnas por dia.

Os cálculos para dimensionamento dos painéis solares são executados observando os níveis de radiação média fornecidos pelo software Sundata (CEPEL-CRESESB, 2017). Os valores de radiação, juntamente com o consumo e rendimento do sistema.

Por fim o dimensionamento do banco de baterias foi demonstrado, considerando a autonomia e o rendimento do sistema, bem como a profundidade de descarga do banco de baterias.

## **4 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS FOTOVOLTAICOS POR ANÁLISE DA DINÂMICA DIÁRIA DE PRODUÇÃO E CONSUMO**

Este capítulo apresenta os cálculos necessários para determinar a posição solar a cada horário para uma posição específica na superfície terrestre, bem como as horas de noite de cada dia no decorrer de um ano. Também serão demonstrados os cálculos para determinar a radiação diária na horizontal e para uma superfície inclinada. O cálculo de produção diária a partir da radiação e temperatura de operação do painel também será apresentado.

### **4.1 INTRODUÇÃO**

No decorrer desse capítulo serão apresentados os cálculos utilizados para desenvolver a tabela de dimensionamento de um sistema fotovoltaico autônomo por análise diária. Por se tratar de uma análise baseada no clima, será considerado o período de 11 anos, devido às alterações climáticas decorrentes de um ciclo solar, que ocorre neste intervalo de tempo (HATHAWAY, 2015).

Por se tratar de uma luminária de uso para iluminação pública a carga será dimensionada a partir das horas noturnas, considerando as horas de cada dia do ano individualmente para determinar a produção da lâmpada.

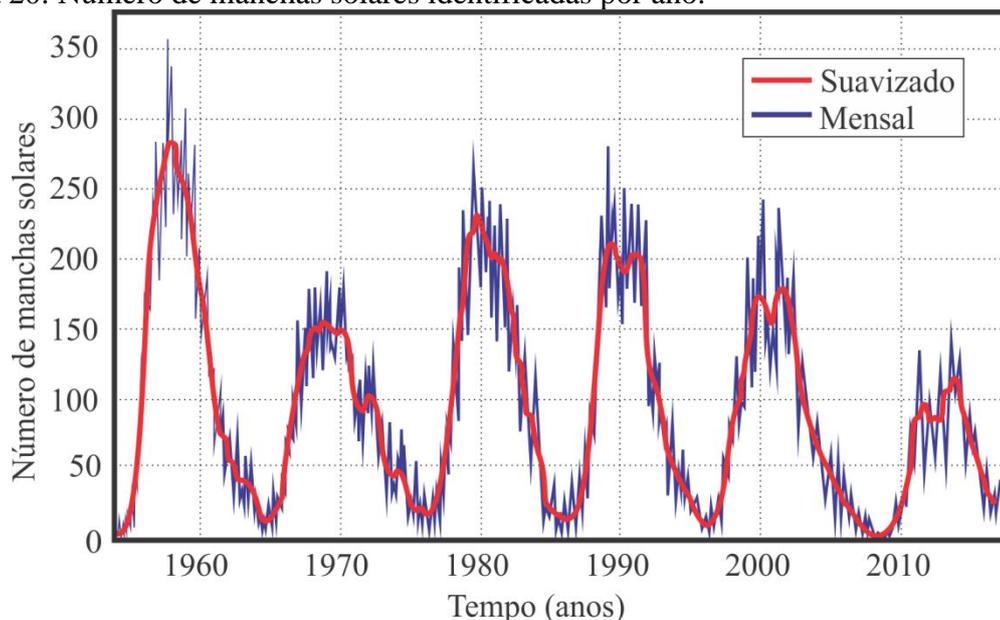
Para determinar a produção do painel solar, é realizado o estudo da posição solar em relação a um ponto na superfície terrestre. Após, definem-se as componentes da irradiância direta, difusa e refletida, com isso pode-se estimar a irradiância incidente no painel solar em um determinado horário e, conseqüentemente, sua produção.

Por fim, é realizada uma análise para validação do método, fazendo o comparativo de uma medição real da produção de energia por um sistema solar e da produção calculada pelas fórmulas apresentadas nesse capítulo.

### **4.2 CICLO SOLAR – DEFINIÇÃO DE AMOSTRAGEM**

O Ciclo solar foi mencionado no ano de 1776 por Christian Horrebow, apesar disso só foi relatado por Heinrich Schwabe 1844, que detectou a presença de manchas solares que surgem e desaparecem de forma cíclica num período aproximado de 11 anos (HATHAWAY, 2015), conforme pode ser observado na Figura 20.

Figura 20: Número de manchas solares identificadas por ano.



Fonte: (SILSO, 2018) adaptado.

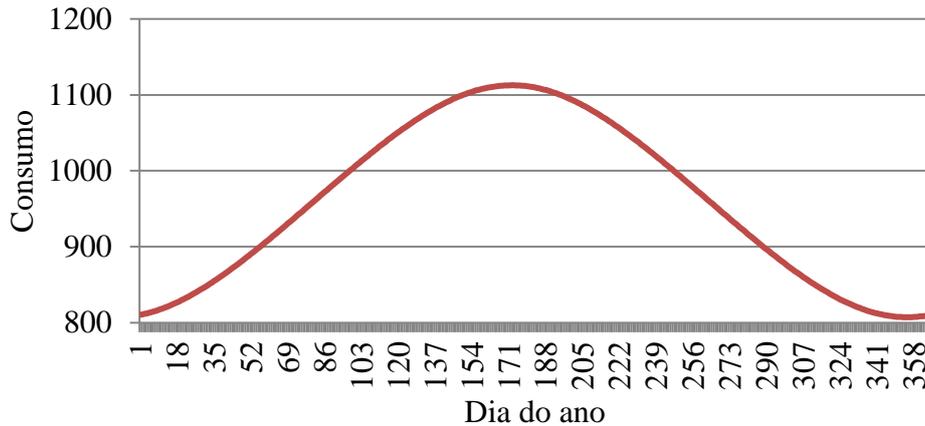
Estas manchas têm influência na intensidade total da radiação solar, fazendo-a também flutuar nesse período, entretanto essa flutuação não apresenta alteração significativa, geralmente em torno de 0,2% (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Além disso, os ciclos solares influenciam diretamente no clima, como por exemplo, ocasionando alteração da temperatura do Pacífico Leste Tropical gerando fenômenos climáticos como El Niño e La Niña. Esses fenômenos têm influência direta no clima de todo o globo (DYBAS e DRUMMOND, 2009).

Assim, para mitigar os erros de dimensionamento que possam vir a ocorrer devido ao ciclo solar, o estudo será realizado dentro de um período de 11 anos, com dados de 2002 a 2013, assim o estudo será realizado abrangendo todas as etapas do ciclo solar.

#### 4.3 PREVISÃO DO CONSUMO PARA CADA DIA DO ANO

O consumo apresentará variação diretamente proporcional às horas de noite de cada dia do ano. Variando seu valor aproximadamente de 807,3Wh no solstício de verão a 1112,7Wh no solstício de inverno, no hemisfério sul, conforme apresentado na Figura 21. Assim a carga considerada nos cálculos será a relativa, especificamente ao dia calculado.

Figura 21: Consumo do sistema no decorrer do ano.



Fonte: Autor

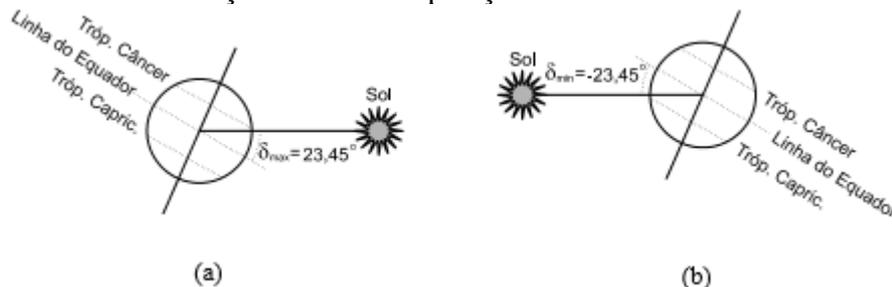
#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DIÁRIA DE ENERGIA

Para determinar a produção diária de energia é preciso saber a radiação incidente sobre os painéis solares. Em posse da radiação que incide sobre os painéis, calcula-se a produção para cada hora do dia e, conseqüentemente, a produção diária desse painel.

##### 4.4.1 Determinação da posição do sol

A terra possui forma esférica e gira em torno de seu eixo, o qual possui uma inclinação de  $23,45^\circ$  em relação ao plano perpendicular do sol. Devido a essa característica ocorrem as estações do ano, fazendo os dias serem mais curtos no inverno e mais longos no verão (REITER, 2016). Esta característica pode ser observada na Figura 22.

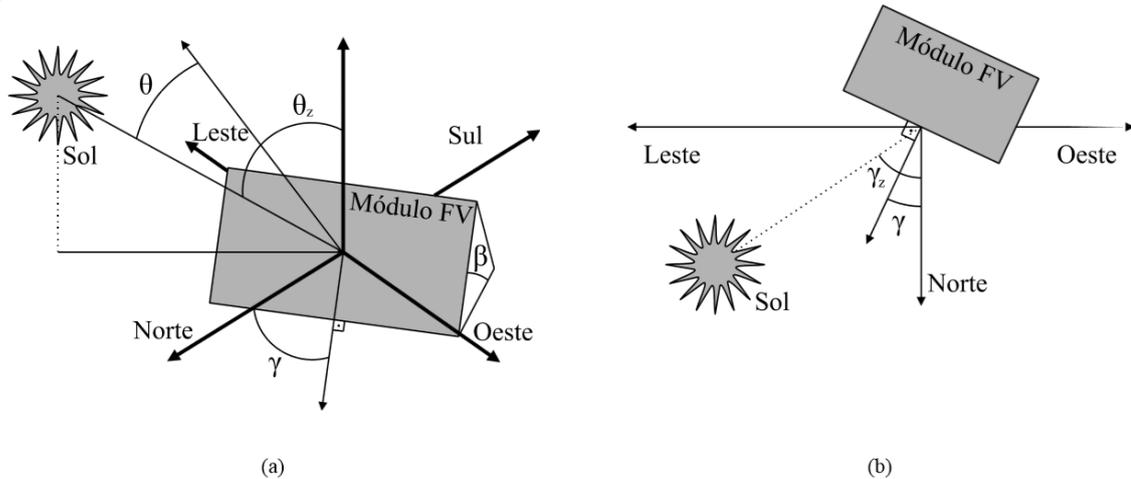
Figura 22: Influência da inclinação terrestre na posição do sol.



Fonte: (REITER, 2016).

Vários ângulos são utilizados para definir a relação geométrica entre a direção dos raios solares, um ponto na superfície terrestre e a posição do Sol no céu em um determinado dia e horário. Esses são representados na Figura 23, e são definidos por (DUFFIE e BECKMAN, 2013):

Figura 23: Representação gráfica (a) Visão isométrica. (b) Vista superior.



Fonte: (REITER, 2016).

- Latitude local ( $\phi$ ): A localização angular do ponto em relação à linha do equador. Varia de  $+90^\circ$  para o norte à  $-90^\circ$  para o sul. Para o local definido como referência no dimensionamento do sistema autônomo de iluminação (Centro de Tecnologia da UFSM, Santa Maria – RS) a latitude considerada é  $29^\circ 42' 40.478''$  Sul ou  $-29.711244^\circ$  em graus decimais.
- Longitude local ( $\sigma$ ): A localização em relação ao Meridiano de Greenwich. Para o dimensionamento é considerado  $53^\circ 43' 13.688''$  W ou  $-53,720469^\circ$  em graus decimais.
- Declinação Solar ( $\delta$ ): É a distância angular entre a direção dos raios do sol e a linha do equador. Variando de  $-23,45^\circ$  para o sul a  $23,45^\circ$  para o norte. É definido pela equação:

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left( \frac{360}{365} (284 - dn) \right) \quad (16)$$

Onde  $dn$  representa o número do dia de interesse no ano (sendo 1 para 1º/jan. e 365 para 31/dez).

- Declive ( $\beta$ ): Ângulo entre o plano da superfície estudada e o horizontal, este ângulo representa a o ângulo de inclinação do painel solar. Varia de  $0^\circ$ , quando paralelo ao plano horizontal, e  $180^\circ$ . Sendo que ângulos maiores de  $90^\circ$  indicam que a superfície encontra-se voltada para baixo. O ângulo de declive definido no capítulo 2 como ideal para a instalação de um painel fotovoltaico de um sistema autônomo de iluminação é o de  $50^\circ$ .

- Ângulo de Hora Solar ( $\omega$ ): É o ângulo que define a hora solar, proveniente do deslocamento do sol de leste a oeste devido a rotação da terra, em graus, variando  $15^\circ$  por hora. Obtido por (REITER, 2016):

$$\omega = 15(lst - 12) \quad (17)$$

Onde  $lst$  indica a hora solar em graus:

$$lst = hl + \left(\frac{1}{15}\right)[-GMT - (-\sigma)] + E + dt \quad (18)$$

$hl$  – indica a hora local.

$GMT$  – Ajuste de horas dependendo do fuso horário.

$dt$  – Ajuste caso haja horário de verão

$E$  – Equação do tempo em horas, definida por:

$$E = 0,165\text{sen}(2B) - 0,126 \cos(B) - 0,025\text{sen}(B) \quad (19)$$

Onde  $B$  é obtido por:

$$B = 360 \left( \frac{dn - 81}{364} \right) \quad (20)$$

- Ângulo Zenital ( $\theta_z$ ): é a posição do Sol em relação ao plano vertical no local. É obtido por:

$$\theta_z = \arccos[\text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega)] \quad (21)$$

- Ângulo de Altitude Solar ( $\alpha$ ): é o complemento do ângulo zenital, formado pela linha horizontal e a posição do sol, logo:

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (22)$$

- Ângulo de Azimute Solar ( $\gamma_z$ ): é o ângulo formado entre o ângulo de incidência solar e o meridiano de referência (norte para o hemisfério sul e sul para o hemisfério norte). Varia ao longo do dia de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ , sendo negativo pela manhã e positivo à tarde. É obtido a partir da seguinte equação.

$$\gamma_z = \begin{cases} -\arccos \left[ \frac{\cos(\theta_z)}{\cos(\alpha)} \right] & , \omega < 0 \\ \arccos \left[ \frac{\cos(\theta_z)}{\cos(\alpha)} \right] & , \omega \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

- Azimute do módulo fotovoltaico ( $\gamma_{pv}$ ): é o ângulo entre o norte geográfico e os módulos fotovoltaicos. Pode ser obtido por

$$\gamma_{pv} = \begin{cases} \gamma - 180^\circ & , \gamma > 0 \\ \gamma + 180^\circ & , \gamma \leq 0 \end{cases}$$

Onde  $\gamma$  representa o desvio azimutal do módulo ( $0^\circ$  para norte,  $90^\circ$  para leste,  $180^\circ$  para sul e  $-90^\circ$  para oeste). Nesse dimensionamento será sempre  $0^\circ$  considerando que a instalação se dará com os painéis instalados sempre para o norte geográfico.

- Ângulo de incidência ( $\theta$ ): É o ângulo entre o feixe em uma superfície e o normal para a superfície (REITER, 2016).

$$\theta = \arccos[\cos(\alpha)\cos(|\gamma_z - \gamma_{pv}|)\sin(\beta) + \sin(\alpha)\cos(\beta)] \quad (24)$$

#### 4.4.2 Cálculo da radiação extraterrestre ( $i_0$ )

Para estimar a radiação presente na superfície terrestre, é preciso saber a radiação que chega até a atmosfera, antes de sofrer interferência de nuvens e dos gases presentes. A terra se encontra 3,3% mais próxima do sol no início de Janeiro em relação a Julho, recebendo aproximadamente 7% a mais de radiação solar (REITER, 2016).

A radiação solar sofre interferência de dois fatores. O primeiro é a variação da radiação emitida pelo Sol devido aos ciclos solares. Essa apresenta pequenas variações, relativas a atividades de manchas solares (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Entretanto, as variações não são significativas para radiação extraterrestre, tendo maior relevância na sua influência no clima terrestre.

Outro fator considerado é a variação da distância da terra que gera uma alteração de  $\pm 3,3\%$ , apresentada na Figura 24 (DUFFIE e BECKMAN, 2013). Essa variação pode ser obtida pela seguinte equação

$$i_0 = 1367E_0\cos(\theta_z) \quad (25)$$

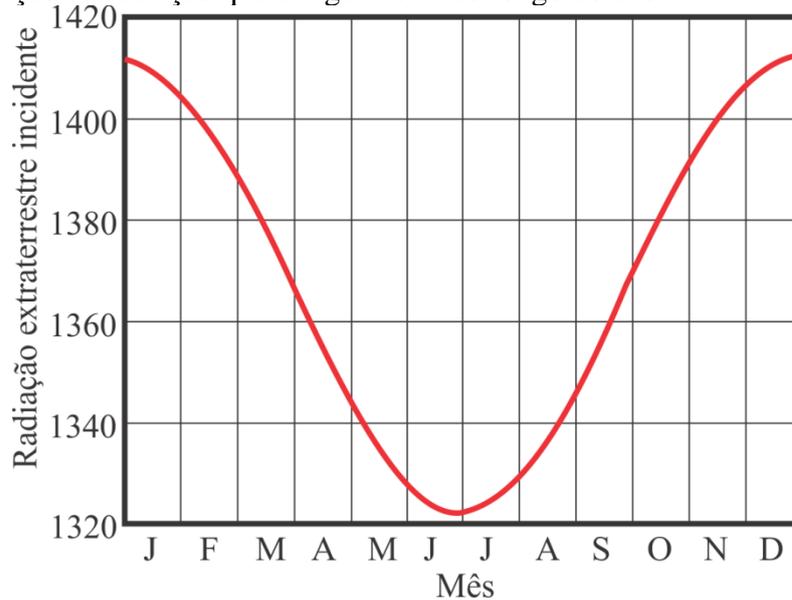
Onde  $E_0$  representa o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (REITER, 2016).

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cos(\Gamma) + 0,00128 \cos(\Gamma) + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma) \quad (26)$$

E  $\Gamma$  representa, o ângulo do dia em radianos.

$$\Gamma = 2\pi \left( \frac{dn - 1}{365,242} \right) \quad (27)$$

Figura 24: Variação da radiação que atinge a terra ao longo do ano.



Fonte: (DUFFIE e BECKMAN, 2013) adaptado.

#### 4.4.3 Radiação na superfície terrestre (*i*)

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento, fornece uma série de dados relacionados à meteorologia. O mesmo possui estações meteorológicas distribuídas por todo país e efetua coleta de dados meteorológicos de radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, dentre outros. Possui acervo digitalizado de informações coletadas desde 1961 no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (INMET, 2017).

Em Santa Maria/RS o INMET possui uma estação meteorológica de observação de superfície automática, localizada nas coordenadas de latitude  $-29,722469^\circ$  e longitude  $-53,720469^\circ$ , inaugurada em Setembro de 2001. Sendo a estação mais próxima do ponto estipulado nesse dimensionamento.

Os dados utilizados para o dimensionamento são a radiação solar, temperatura e velocidade do vento e precipitações do período de Janeiro de 2002 à Dezembro de 2013. A radiação solar é utilizada para determinar a capacidade de geração do painel solar, enquanto a velocidade dos ventos e a temperatura são utilizadas para determinar a temperatura de operação do painel.

A incidência de precipitação foi uma forma de analisar dias em que houve alguma falha de medição no sistema, nesse caso utiliza-se o valor de um dia com características

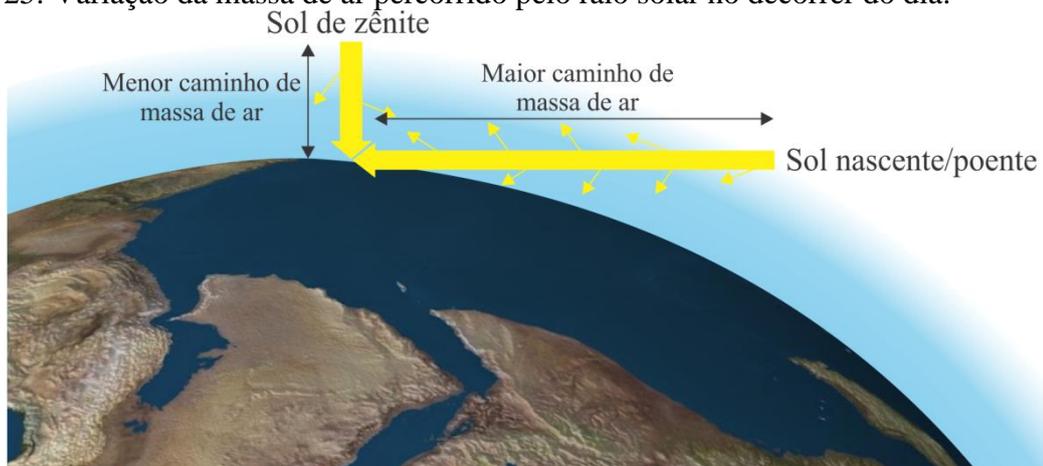
similares de precipitação, com data aproximada, ocorrente no mesmo ou em outro ano com as mesmas características.

#### 4.4.4 Irradiação solar direta e difusa na superfície terrestre.

A radiação solar sofre alterações após entrar na atmosfera até atingir a superfície terrestre. Uma parcela da energia é refletida e acaba nem tocando a superfície, outra parte é espalhada ou absorvida pela atmosfera (REITER, 2016).

As perdas que ocorrem na atmosfera são determinadas, além do comprimento da onda, pela natureza e o tamanho do material que intervém (REITER, 2016). Assim sendo, a intensidade da radiação solar que chega à superfície tem relação com os componentes presentes na atmosfera e com o comprimento do caminho que a radiação precisa percorrer da massa de ar, como apresentado na Figura 25.

Figura 25: Variação da massa de ar percorrido pelo raio solar no decorrer do dia.

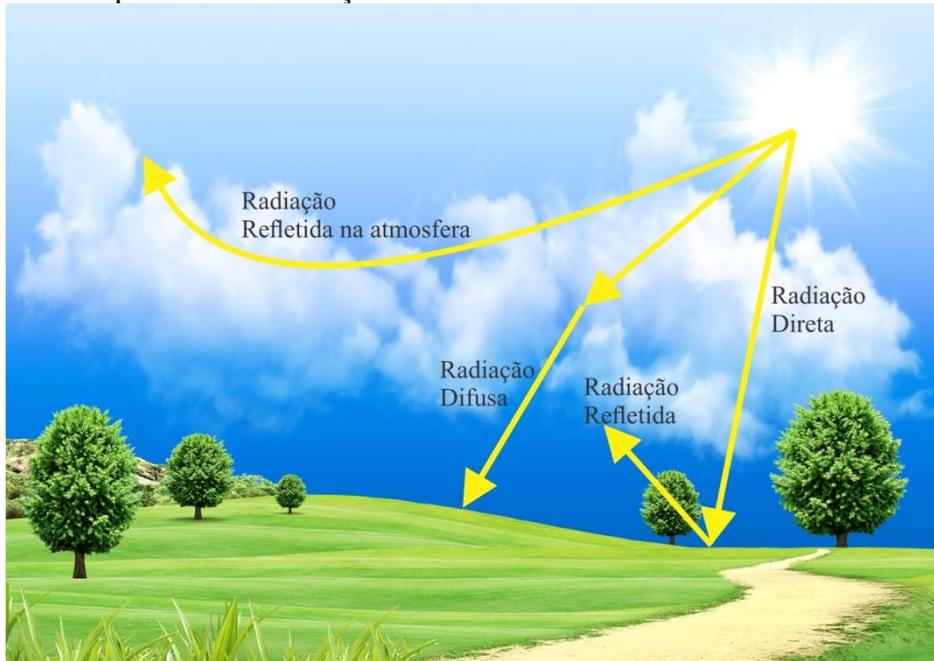


Fonte: Autor.

Assim, a radiação pode chegar ao painel de várias formas, como apresentado na Figura 26. As radiações que atingem o painel podem ser classificadas em:

- Radiação direta: proveniente diretamente do Sol sem sofrer influência de obstáculos.
- Radiação difusa: que passa por um obstáculo e chega ao painel solar a partir de difusão.
- Radiação refletida: refletida do ambiente atingindo o painel.

Figura 26: Componentes da radiação solar.



Fonte: Autor.

Determinadas situações aumentam uma ou outra componente, como pode ser observado na Tabela 5. Sendo que a radiação refletida possui relação direta com a radiação direta.

Tabela 5: Intensidade das componentes da radiação para cada tipo de dia.

<b>Tipo de dia</b>	<b>Irradiância direta</b>	<b>Irradiância difusa</b>
Dia ensolarado	Elevada	Reduzida
Dia ensolarado com nuvens	Média	Média
Dia nebuloso	Insignificante	Elevada
Dia nublado	Nenhuma	Média
Dia chuvoso	Nenhuma	Pequena

Fonte: Autor.

Conhecidas a radiação extraterrestre estimada e a radiação medida na superfície terrestre, pode-se estimar a radiação direta e difusa. Estas componentes são obtidas a partir do índice de limpidez atmosférica ( $k_t$ ) (DUFFIE e BECKMAN, 2013), obtido por:

$$k_t = \frac{i}{i_0} \quad (28)$$

A partir de  $k_t$  pode-se estimar a irradiância difusa utilizada no modelo apresentado em (DUFFIE e BECKMAN, 2013) com limites modificados por (REITER, 2016), a partir da seguinte equação:

$$\hat{i}_{dif} = \begin{cases} (0,995 - 0,081k_t)i & , \quad k_t < 0,35 \\ (0,724 + 2,738k_t - 8,32k_t^2 + 4,967k_t^3)i & , \quad 0,35 \leq k_t \leq 0,7 \\ 0,06i & , \quad k_t > 0,7 \end{cases} \quad (29)$$

Já a irradiância direta pode ser estimada a partir da irradiância difusa, obtida por:

$$\hat{i}_{dir} = i - \hat{i}_{dif} \quad (30)$$

#### 4.4.5 Estimativa da irradiância direta, difusa e refletida incidente sobre o painel

A irradiância total que chega ao painel fotovoltaico é resultado da soma das irradiâncias direta, difusa e refletida, incidentes sobre o mesmo. Para estimar essas, utilizam-se os ângulos de posição solar e de inclinação do painel já revisados nesse capítulo. A radiação direta é obtida por:

$$\hat{i}_{dir\ pv} = \hat{i}_{dir} r_b f_{rfl} \quad (31)$$

Onde  $f_{rfl}$  é o fator de reflexão dos módulos fotovoltaicos. Considerando  $b_0$  o fator de reflexão do vidro, em módulos fotovoltaicos tipicamente utiliza-se 0,05 (REITER, 2016)

$$f_{rfl} = 1 - b_0 \left[ \frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right] \quad (32)$$

E  $r_b$  é o fator de correção geométrica.

$$r_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (33)$$

Já a radiação difusa é obtida pela seguinte equação:

$$\hat{i}_{dif\ pv} = 0,5\hat{i}_{dif} [1 + \cos(\beta)] \quad (34)$$

E a radiação refletida incidente no painel solar define-se pela equação:

$$\hat{i}_{rfl\ pv} = 0,5 i \rho [1 - \cos(\beta)] \quad (35)$$

Onde  $\rho$  representa o albedo, considerado no dimensionamento como 0,3, relativo ao valor médio encontrado na Terra (REITER, 2016).

Em posse das três componentes a irradiância global é a soma dessas:

$$\hat{i}_{pv} = \hat{i}_{dir\ pv} + \hat{i}_{dif\ pv} + \hat{i}_{rfl\ pv} \quad (36)$$

#### 4.4.6 Estimativa da geração do painel por hora

Com as irradiâncias incidentes sobre o painel solar, a geração do mesmo pode ser obtida por (REITER, 2016):

$$\hat{p} = \hat{i}_{pv} \eta_{pv} A_{pv} [1 - K_{pv} (\hat{t}_{pv} - 25)] \quad (37)$$

Onde  $\eta_{pv}$  é a eficiência dos módulos fotovoltaicos obtida por:

$$\eta_{pv} = \frac{i_{mppt} v_{mppt}}{1000 A_{pv}} \quad (38)$$

$A_{pv}$  é a área do módulo fotovoltaico e  $K_{pv}$  é o coeficiente de perdas em função da temperatura. Essas informações estão disponíveis no *datasheet* do painel solar (CANADIAN, 2017). Alguns exemplos desses valores são demonstrados na Tabela 6 (CANADIAN, 2017).

Tabela 6: Comparativo de dados referentes a painéis fotovoltaicos.

Painel	Potência	$I_{mppt}$ (A)	$V_{mppt}$ (V)	$A_{pv}$ (m <sup>2</sup> )	$K_{pv}$ (%/°C)
CS6K-280M	280kWp	8,89	31,5	1,57	-0,41
CS6K-290M	290kWp	9,09	31,9	1,57	-0,41
CS6K-300MS	300kWp	9,24	32,5	1,57	-0,39
CS6U-330M	330kWp	8,80	37,5	1,94	-0,41
CS6U-340	340kWp	8,97	37,9	1,94	-0,41

Fonte: (CANADIAN, 2017).

Com os dados de geração a cada hora do dia para um determinado dia do ano, o somatório dessas horas resultará na geração total diária ( $G_d$ ).

$$G_d = \sum_{h=h_I}^{h_F} \hat{p}(h) \quad (39)$$

Sendo  $h_I$  a primeira hora do dia com radiação solar e  $h_F$  a última hora do dia com radiação solar.

#### 4.4.7 Estimativa da temperatura do módulo

A temperatura no painel ( $\hat{t}_{pv}$ ) pode ser estimada a partir da temperatura ambiente e da velocidade do vento local. Os valores para o dimensionamento deste sistema foram obtidos pelo INMET, e calculados pela seguinte equação (TAMIZHMANI, JI, *et al.*, 2003):

$$\hat{t}_{pv} = 0,943t_{amb} + 0,028\hat{t}_{pv} - 1,528v_{vto} + 4,3 \quad (40)$$

Onde  $t_{amb}$  é a temperatura ambiente e  $v_{vto}$  é a velocidade do vento.

#### 4.5 COMPROVAÇÃO DO MÉTODO

Após efetuar os cálculos é preciso verificar a acuidade do método para determinar a potência dos painéis solares. É demonstrado por (REITER, 2016) que o método apresentou um erro de aproximadamente 3 a 5% na estimação da potência. Entretanto, esse cálculo define a produção a partir da irradiância, temperatura e velocidade do vento de um horário específico.

O método proposto expandiu essa para todas as horas do dia, o que pode aumentar significativamente o erro, uma vez que se considera a produção instantânea expandida no decorrer de uma hora do dia. Assim, foi feito o acompanhamento de um sistema solar fotovoltaico com as características apresentadas na Tabela 7.

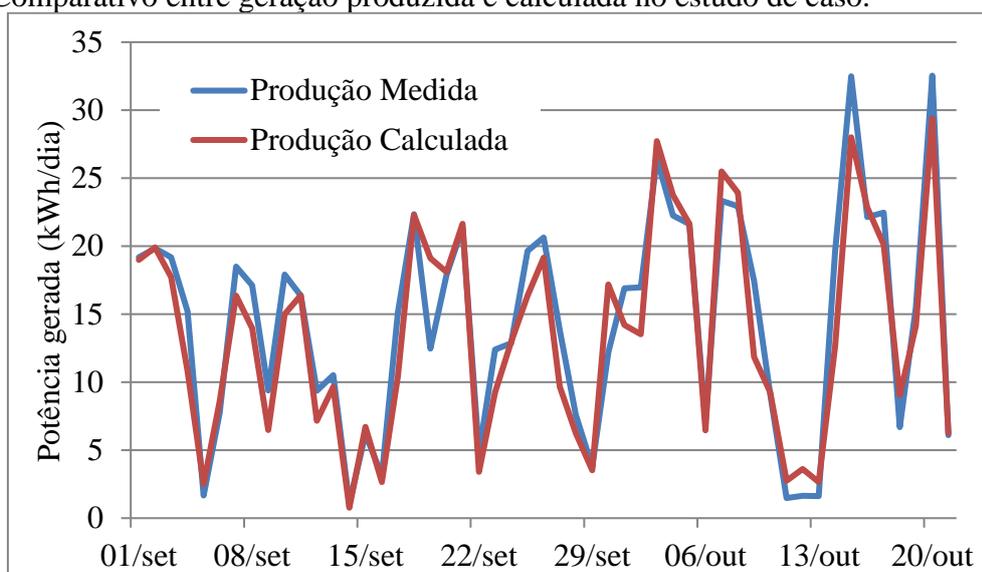
Tabela 7: Sistema utilizado para comprovação do método de dimensionamento.

<b>Localização do sistema</b>	<b>Latitude local</b>	-30.049894
	<b>Longitude local</b>	-52.889982
<b>Potência de painéis instalada</b>		3,2kWp (10x320Wp)
<b>Informações referentes aos painéis solares</b>	<b>Fabricante</b>	Risen Solar Technology
	<b>Modelo</b>	RSM72-6-320P
	<b>Corrente de MPP</b>	8,60 A
	<b>Tensão de MPP</b>	37,30 V
	<b>Eficiência</b>	16,5%
	<b>Dimensões</b>	(1956 x 992 x 40) mm
<b>Informações referentes ao inversor</b>	<b>Fabricante</b>	B&B Power
	<b>Modelo</b>	SF3000TL
	<b>Potência</b>	3000 W
	<b>Eficiência Máxima</b>	97,8%
<b>Desvio azimutal</b>		17°
<b>Inclinação do módulo</b>		14°

Fonte: (RISEN, 2018; B&B-POWER, 2014) adaptado.

Em posse das informações de produção disponibilizadas pelo sistema de monitoramento do inversor B&B Power utilizado nessa instalação, foi feita a comparação com os valores encontrados para um período de quatro meses, de 1° de setembro a 20 de outubro de 2017. Conforme pode ser observado na Figura 27, os valores calculados acompanham os valores medidos pelo inversor. Para realizar esse cálculo, as perdas do inversor foram consideradas (B&B-POWER, 2014). Considerando a distância de aproximadamente 85 km entre a estação meteorológica e o ponto em que o sistema foi instalado, além dos erros de instrumentação e de perdas no sistema, é possível dizer que a radiação estimada encontrada condiz com a produção real, validando assim os cálculos utilizados no dimensionamento. A diferença média entre a produção medida e calculada é de 8%.

Figura 27: Comparativo entre geração produzida e calculada no estudo de caso.



Fonte: Autor.

#### 4.6 CONCLUSÃO

Ao realizar análises em que alterações climáticas são relevantes, como é o caso desse trabalho, faz-se necessário considerar a variação da presença de manchas solares, também conhecida como Ciclo Solar, que ocorre a cada 11 anos. Uma vez que esse tem influência direta no clima global, exercendo influência em fenômenos como *El Niño* e *La Niña*.

Esse método de dimensionamento diferencia-se dos demais por realizar a análise diária da geração e do consumo de energia. Utilizando-se de métodos presentes na literatura para determinar a potência instantânea, foi analisada a potência de cada hora do dia para cada dia do ano, desenvolvendo-se assim, um método de determinar a capacidade de produção de um painel solar.

O estudo das horas de noite possibilitou conhecer o consumo diário da luminária LED em cada dia do ano estudado, considerando as perdas já estudadas no capítulo 3. Essa variação demonstrou maior necessidade de energia no solstício de inverno, devido as mais de 13 horas de noite, comparado às 10 horas ocorrentes no período próximo ao solstício de verão.

Para determinar a produção do painel solar foi necessária a determinação da posição solar em relação a um ponto na superfície terrestre. Essa pôde ser determinada através de uma série de ângulos. Em posse da posição solar a radiação extraterrestre é determinada.

Com a radiação extraterrestre e a radiação solar medida em mãos, é possível estimar a irradiância direta, difusa e refletida que incidem sobre um painel solar. E com essas pode-se

calcular a produção do painel. Dados como a temperatura ambiente e a velocidade do vento possibilitaram calcular a temperatura do painel solar, aumentando assim a precisão do resultado obtido.

A comprovação da eficácia do método de cálculo é apresentada ao comparar os cálculos com uma situação de teste, onde o modelo apresentado acompanhou os valores reais obtidos de um sistema de monitoramento de energia solar produzida.

## 5 ESTRATÉGIAS DE DIMERIZAÇÃO

Este capítulo apresentará as vantagens da dimerização nos sistemas de iluminação demonstrando algumas técnicas de dimerização baseadas no nível de carga do banco de baterias ao anoitecer.

### 5.1 INTRODUÇÃO

Devido às muitas variações climáticas ocorrentes no decorrer de um ano, dimensionar um sistema fotovoltaico é uma tarefa complicada. Períodos com mais de três dias de baixos níveis de radiação são comuns podendo ocorrer mais de 10 vezes no decorrer de um ano (INMET, 2017). Além disso, ao menos uma vez por ano, no período estudado, pode ser verificado ao menos uma ocorrência de sete dias ou mais com radiação abaixo dos 2 kWh/m<sup>2</sup>.dia.

Para dimensionar o sistema que supra esses períodos de baixa radiação o sistema precisa ser superdimensionado. Esse superdimensionamento resulta em altos custos, grande área instalada de painéis, dentre outros fatores que acabam inviabilizando projetos de sistemas fotovoltaicos autônomos.

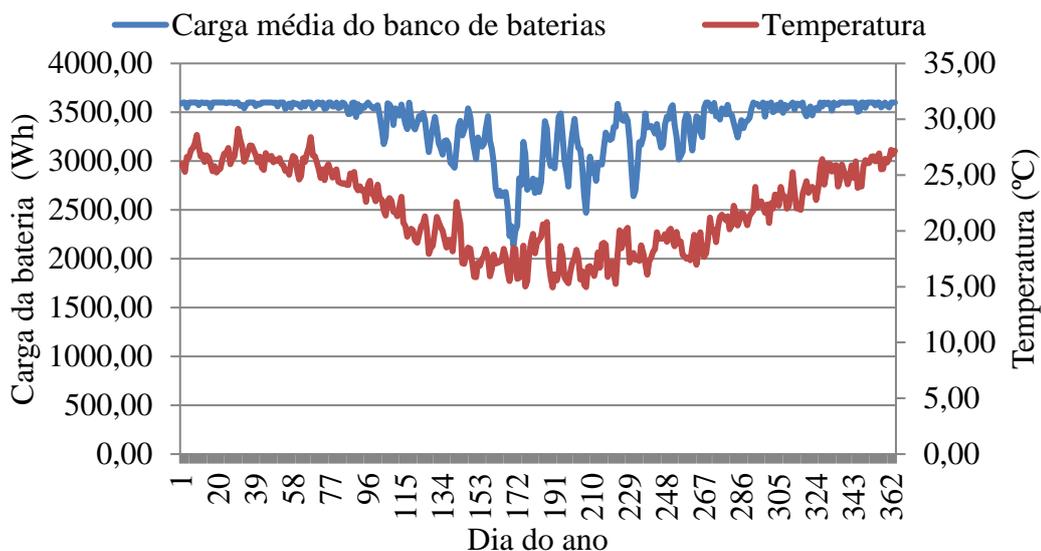
Para que não seja necessário um dimensionamento tão exagerado uma solução que pode ser adotada é a dimerização do LED. Assim, quando necessário, a luminária trabalhará com menor potência possibilitando aos painéis recuperarem a energia para recarregar o banco de baterias em períodos de radiação.

### 5.2 DIMERIZAÇÃO DA CARGA

Conforme apresentado no capítulo 2, o método de dimerização que melhor se adequa ao sistema fotovoltaico autônomo de iluminação pública é a dimerização por amplitude de corrente, uma vez que essa apresenta maior taxa de lumens por watt quando a luminária é dimerizada. Além disso, o período em que ocorrem as dimerizações é responsável por garantir maior eficácia da luminária.

No gráfico da Figura 28 é apresentado o período em que há maior decréscimo da carga da bateria, logo onde há dimerização. Sobreposto a esse período é apresentado o gráfico da temperatura ambiente, demonstrando que a dimerização ocorrerá na maioria das vezes, nos períodos de inverno.

Figura 28: Comportamento médio do banco de baterias e temperatura ao longo de um ano.



Fonte: Autor.

A dimerização nos períodos de inverno é decorrente da menor taxa de radiação, que diminui a produção, e do maior consumo, devido às horas de noite, conforme foi demonstrado nos capítulos 3 e 4. As temperaturas mais baixas neste período são favoráveis a uma maior eficácia da luminária, aumentando assim sua luminosidade, mesmo com dimerizações. Essa característica é apresentada no capítulo 2.

Assim, pode-se afirmar que a luminária apresenta maior eficácia durante a dimerização, logo quando a luminária é dimerizada a mesma apresenta um decréscimo percentual menor de lumens emitidos em relação potência dimerizada.

### 5.3 ESTRATÉGIAS DE DIMERIZAÇÃO

Para definir a melhor estratégia de dimerização a ser adotada neste projeto, foram analisadas oito estratégias de dimerização diferentes, definidas pelo autor. A carga do banco de baterias ocorre no decorrer do dia e a descarga no período da noite. A maioria das estratégias de dimerização estudada se baseia na carga do banco de baterias ao anoitecer, antes de iniciar a descarga noturna. Sendo assim, o nível de carga no início da noite determina o nível de dimerização da lâmpada, no decorrer de toda a noite.

A forma como o sistema foi dimerizado em cada estratégia será descrita no decorrer desse capítulo. Em nenhuma das análises foi permitida a luminária funcionar com menos de 30% de sua potência nominal. Essa característica garante funcionamento mínimo da luminária a 18W de potência, potência encontrada em algumas luminárias comerciais de iluminação pública.

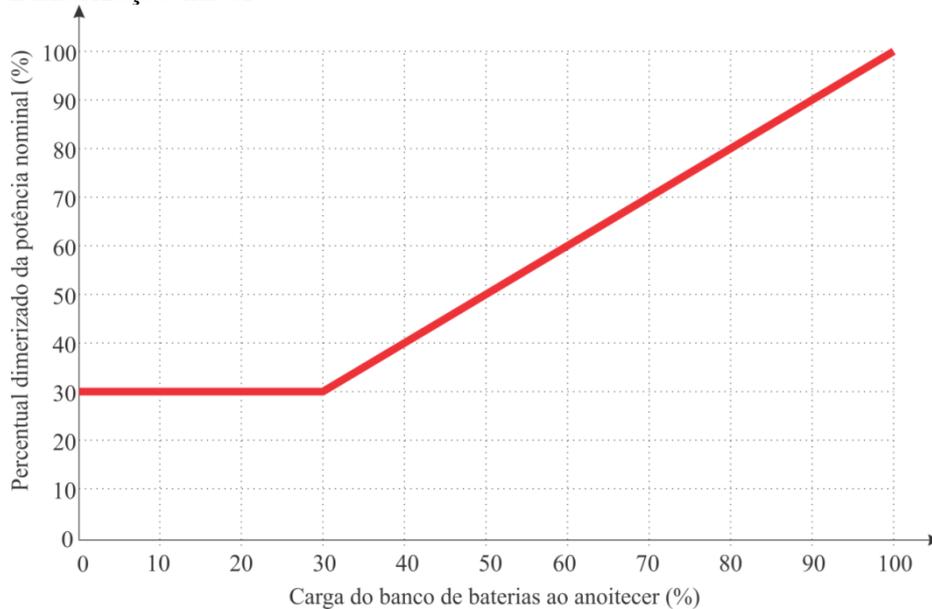
Para definir os níveis de dimerização foram considerados dois momentos. O amanhecer, como o período em que a lâmpada deixa de consumir e o painel solar passa a produzir energia. E o anoitecer que é o período em que o painel solar passa a não gerar mais energia e a lâmpada precisa ser acionada por falta de luminosidade natural. A carga do banco de baterias considerada nos cálculos consiste na carga das baterias no anoitecer, e o nível de dimerização considerado é aplicado a todo o período noturno.

Há ainda a possibilidade de a dimerização alternar no decorrer da noite, baseando-se em horários de maior fluxo ou da iluminação solar ainda presente, principalmente no amanhecer ou anoitecer. Esse estudo não foi desenvolvido no escopo do trabalho, utilizando apenas o percentual de dimerização da potência da lâmpada, para efetuar o dimensionamento do sistema.

### 5.3.1 Dimerização linear

Essa dimerização é feita de acordo com a carga do banco de baterias ao anoitecer. O percentual do banco de baterias ao anoitecer é exatamente o percentual que será utilizado na dimerização. A Figura 29 apresenta a relação entre a carga do banco de baterias ao anoitecer e o percentual de dimerização adotado para o sistema durante o período da noite.

Figura 29: Dimerização linear.

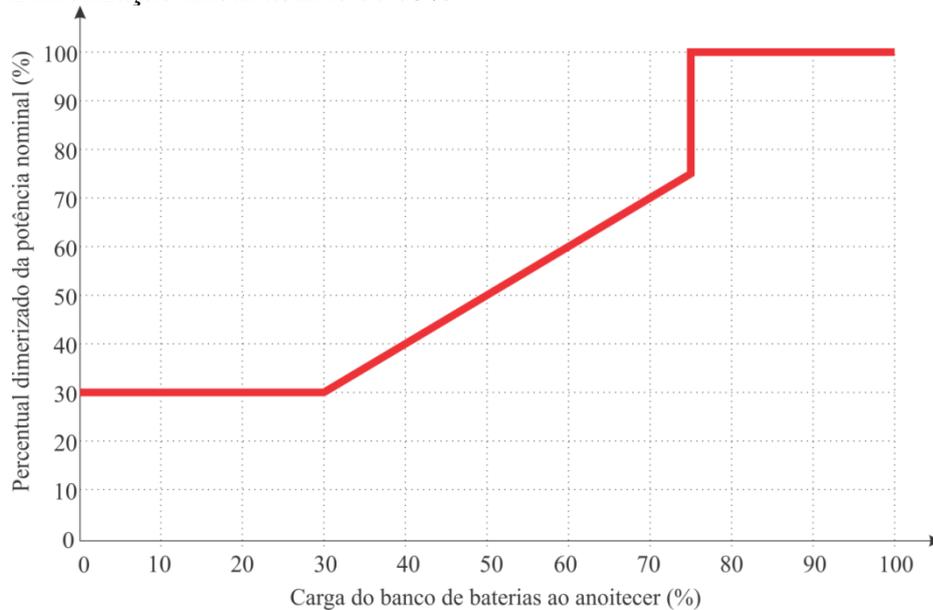


Fonte: Autor.

### 5.3.2 Dimerização linear abaixo de 75%

Para esta estratégia de dimerização a lâmpada não será dimerizada para valores maiores que 75%, para os demais valores será dimerizada linearmente conforme o decréscimo da carga de 75% até os 30% mínimos estabelecidos, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 30: Dimerização linear abaixo de 75%.

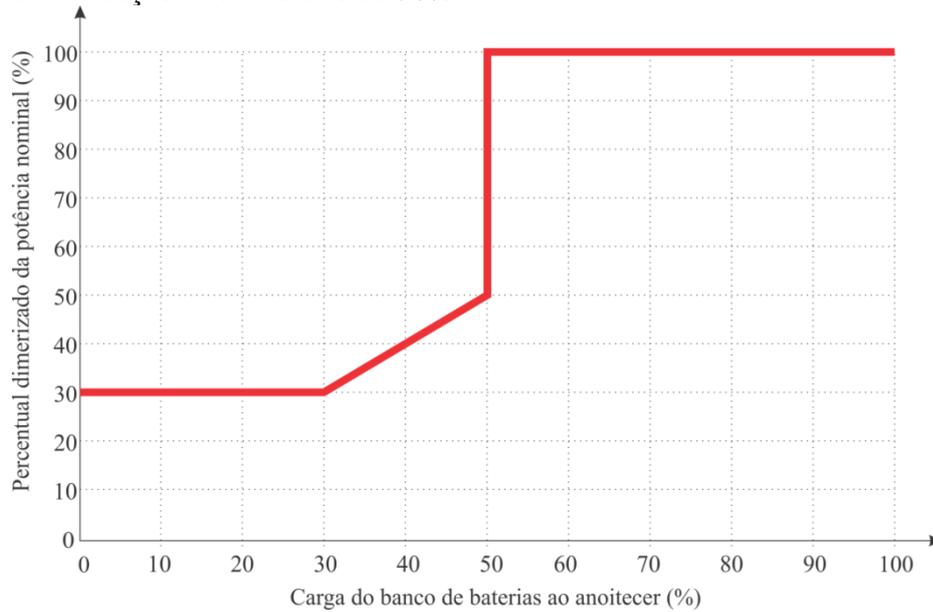


Fonte: Autor.

### 5.3.3 Dimerização linear abaixo de 50%

Similarmente a segunda estratégia de dimerização, a lâmpada será dimerizada linearmente, entretanto a partir de 50% não haverá mais dimerização, com a lâmpada operando à sua potência nominal. A Figura 31 representa esta estratégia de dimerização.

Figura 31: Dimerização linear abaixo de 50%.



Fonte: Autor.

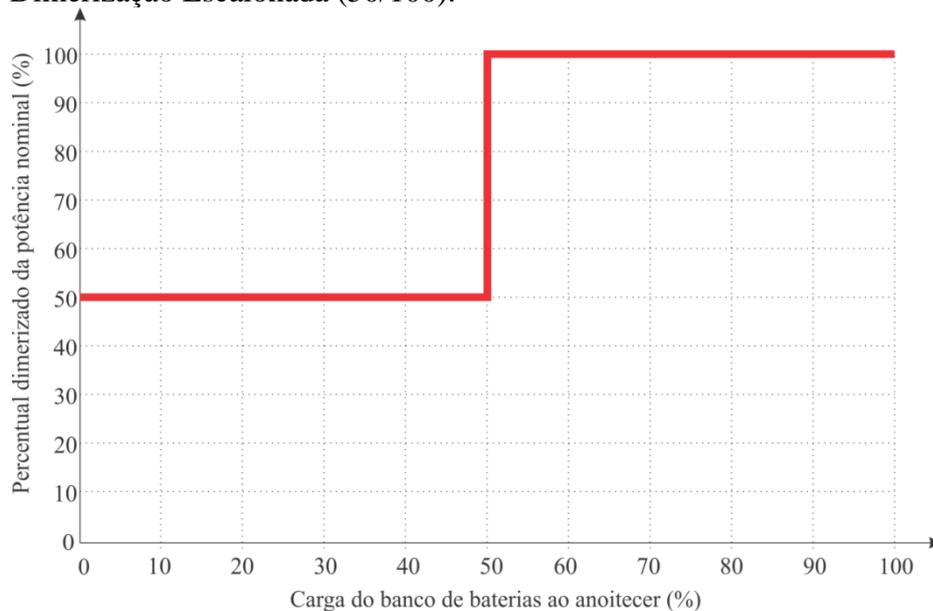
#### 5.3.4 Escalonada (50/100)

Esta estratégia será escalonada em 2 níveis.

- Se a carga da bateria for menor que 50% a luminária será dimerizada em 50% da potência nominal.
- Para cargas maiores de 50% o sistema não será dimerizado.

A Figura 32 apresenta graficamente esta estratégia de dimerização.

Figura 32: Dimerização Escalonada (50/100).



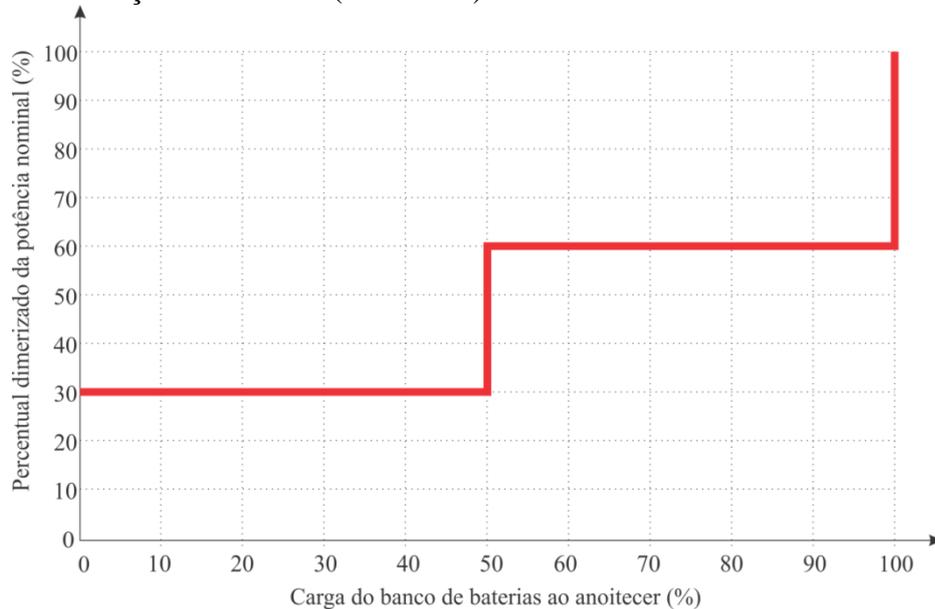
Fonte: Autor.

### 5.3.5 Escalonada (30/60/100) restritiva

O escalonamento desta estratégia é similar ao da anterior, porém a dimerização é mais restritiva. A Figura 33 apresenta a estratégia e seus critérios são os que seguem:

- Para carga da bateria menor que 60% ao anoitecer a luminária será dimerizada em 30% da potência nominal.
- Se a carga da bateria for maior que 60% e menor que 100% a luminária será dimerizada em 60% da potência nominal.
- Quando a bateria estiver completamente carregada o sistema não será dimerizado.

Figura 33: Dimerização escalonada (30/60/100) restritiva.

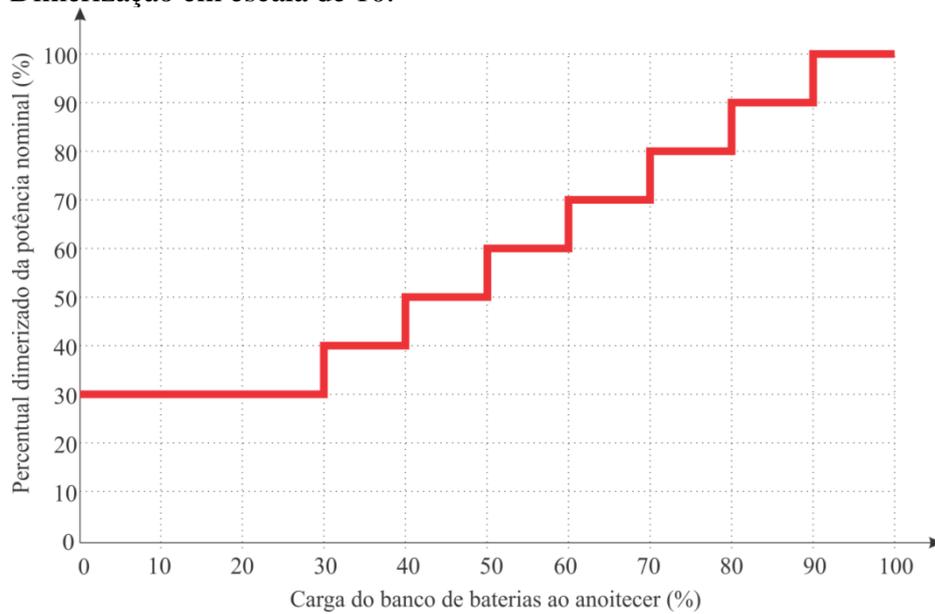


Fonte: Autor.

### 5.3.6 Escala de 10

Nesta estratégia a dimerização é escalonada a cada 10%, iniciando em 30% pré-determinado. O restante a dimerização é equivalente ao percentual em que a bateria se encontra, como apresentado na Figura 34.

Figura 34: Dimerização em escala de 10.

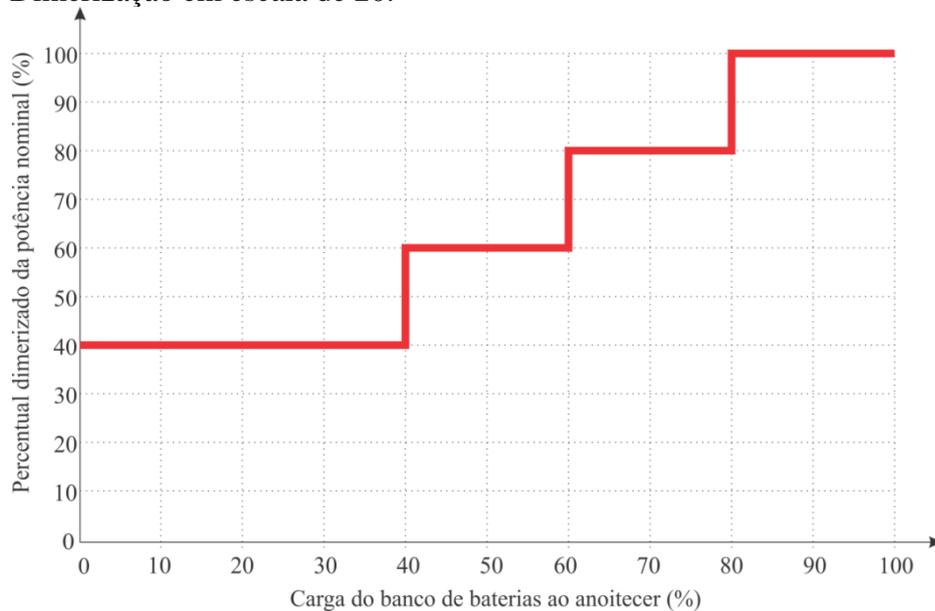


Fonte: Autor.

### 5.3.7 Escala de 20

A estratégia em escala de 20 segue a lógica da estratégia anterior escalonando a mesma a cada 20% iniciando em 40%, conforme o gráfico da Figura 35.

Figura 35: Dimerização em escala de 20.



Fonte: Autor.

### 5.3.8 Dimerização fixa 50/50

Essa é a única estratégia de dimerização que não leva em consideração a carga da bateria. A dimerização é fixada em 50% da potência nominal durante 50% do tempo (DALLA

COSTA, SCHUCH, *et al.*, 2010). Essa estratégia dimeriza o sistema em 75% da potência nominal, mesmo quando a carga da bateria estiver completa.

#### 5.4 CONCLUSÃO

Fica claro a partir das informações apresentadas nesse capítulo que a dimerização é necessária para sistemas fotovoltaicos autônomos de iluminação. Com a dimerização é possível flexibilizar o dimensionamento do sistema, e garantir que o sistema não apresentará falhas em situações normais, quando comparado ao período estudado.

A dimerização em sistemas de iluminação pública a LED é viabilizada pelas características elétricas e térmicas do LED. O efeito *Droop* que ocorre nos LEDs dimerizados aumenta a eficácia do sistema quando dimerizado. Além disso, a menor corrente pela dimerização, juntamente com a utilização da dimerização em períodos de inverno diminuem a temperatura de junção dos LEDs, aumentando o fluxo luminoso, e conseqüentemente a eficácia do LED.

As estratégias de dimerização apresentadas visam abranger desde estratégias mais flexíveis, como a dimerização linear e a dimerização em escala de 10, até estratégias mais bruscas como a estratégia 30/60/100 restritivo e a estratégia 50/100.

Praticamente todas as dimerizações escolhidas têm por referência, a carga do banco de baterias no período do anoitecer, essa característica faz com que a dimerização do banco de baterias acompanhe a capacidade de recuperação do painel solar no último período com radiação solar incidente. A dimerização fixa foi inclusa na análise para fins de comparação com as análises que acompanham a carga do banco de baterias.

## 6 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo apresenta a aplicação dos cálculos das metodologias de dimensionamento pelo método de médias mensais e pelo método que se utiliza da dinâmica diária de produção e consumo do sistema. A análise dos resultados obtidos para cada dimensionamento e do comportamento de ambos os sistemas quando dimerizado também será apresentada neste capítulo.

### 6.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo visa realizar o dimensionamento do sistema estudado até então a partir dos métodos de médias mensais e da dinâmica diária de produção e consumo, estudados nos capítulos 3 e 4, respectivamente. Além disso, a comparação dos resultados e análise de ambos no período de 11 anos estudado, aplicando os métodos de dimerização apresentados no capítulo 5.

Para determinar a produção e consumo do sistema durante todo o período estudado foram utilizados os cálculos apresentados no capítulo 4. Obteve-se a posição do Sol para cada dia e horário no período de um ano, calculando os ângulos que determinam essa posição. A partir desses, é calculada a radiação extraterrestre para todos os horários de todos os dias do ano.

Após, calculam-se as componentes direta e difusa da radiação solar na superfície terrestre do ponto pré-determinado. O cálculo é realizado a partir do índice de limpidez atmosférica, encontrado a partir da radiação extraterrestre calculada, e da radiação medida na superfície terrestre. Com as radiações na superfície terrestre, é possível determinar a radiação incidente sobre o painel fotovoltaico. Com esses, é determinada a produção para variadas faixas de potência instalada do painel fotovoltaico. O consumo do sistema é encontrado pelo produto das horas noturnas para cada dia do ano e da potência utilizada pela luminária.

O sistema foi dimensionado utilizando o método de dimerização tradicional cujos cálculos foram apresentados no capítulo 3, demonstrando a facilidade de dimensionamento como uma característica desse método. Já para o segundo método de dimensionamento, foi utilizada a tabela de dimensionamento dos painéis solares e do banco de baterias para encontrar o ponto com melhor custo-benefício em cada caso.

Ambos os dimensionamentos foram apresentados e comparados a partir das estratégias de dimerização. Por fim, foi determinado o banco de baterias ideal para cada estratégia de

dimerização em cada um dos métodos de dimensionamento, realizando um comparativo desses.

## 6.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO E PRODUÇÃO DO SISTEMA PARA CADA DIA ESTUDADO

Para que fosse possível analisar a produção e o consumo do sistema no período estudado, desenvolveu-se uma tabela com essas informações. Nela pode-se observar a produção de energia durante o dia e o consumo durante a noite. Observando a carga do banco de baterias no anoitecer e no amanhecer, pôde-se testar o comportamento do sistema e, conseqüentemente, a eficácia dos métodos de dimensionamento e de dimerização apresentados.

Para o desenvolvimento desta tabela, foram utilizados os cálculos apresentados no capítulo 4. Com os dados obtidos do INMET e determinando a posição do Sol para encontrar as componentes da radiação incidente sobre o painel solar. Encontrando, com essas informações, a produção e o consumo do sistema para cada dia no período estudado.

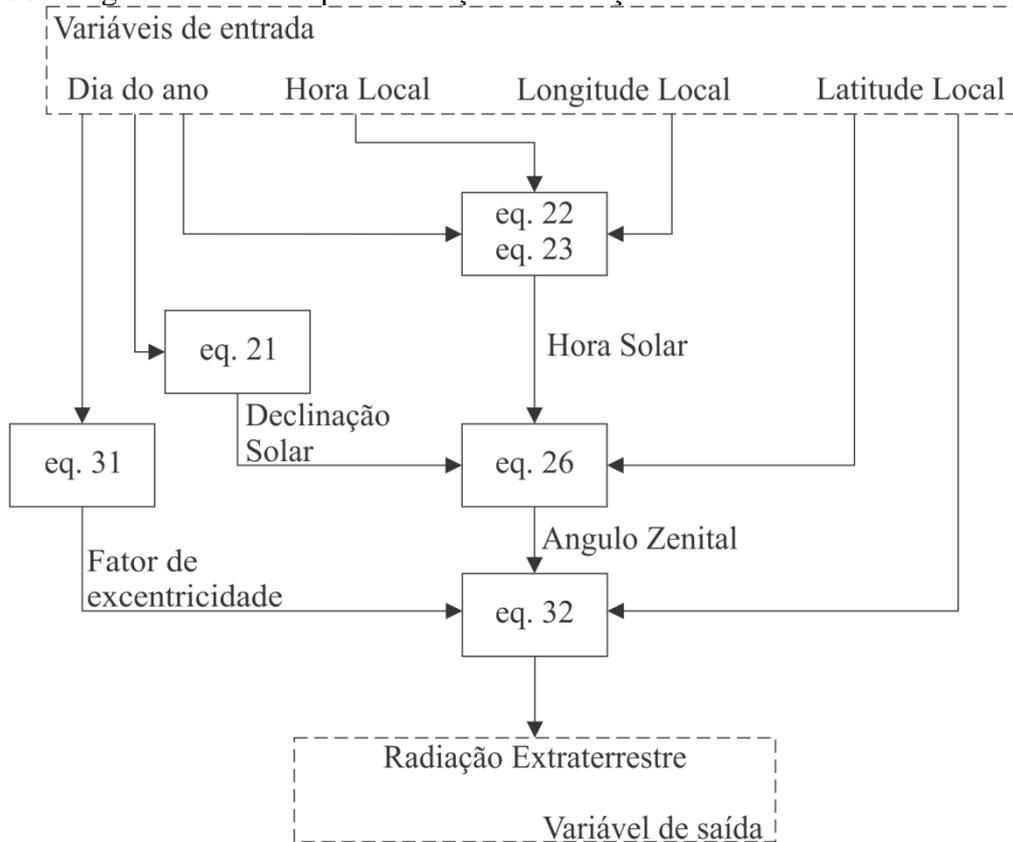
### 6.2.1 Determinação da posição do Sol e radiação extraterrestre

Para determinar a posição do Sol, foram realizados os cálculos que definem a posição solar para todos os horários de todos os dias no período de um ano. Para cada horário de cada dia encontrou-se a declinação solar, o ângulo de horário do sol, o ângulo do dia e o ângulo Zenital. Assim, tornou-se possível determinar a radiação extraterrestre.

Com a radiação extraterrestre encontrada, os valores de radiação extraterrestre menores que zero foram eliminados, diminuindo a necessidade de processamento de dados irrelevantes nesse estudo. Assim, na tabela, passou-se a considerar os horários com iluminação solar, para todos os dias do ano.

Os dados de radiação terrestre, temperatura e velocidade dos ventos obtidos pelo INMET, vieram na unidade de tempo universal coordenado (*Universe Time Coordinated – UTC*). Assim, foi necessário adequar o horário da radiação extraterrestre para alinhar com as demais informações. Todo processo para obtenção da radiação extraterrestre é demonstrado no diagrama de blocos da Figura 36.

Figura 36: Diagrama de blocos para obtenção da radiação extraterrestre.



Fonte: Autor.

### 6.2.2 Definição das componentes diretas e difusa

Em posse dos dados de radiação extraterrestre calculados e de radiação medida na superfície terrestre, calcula-se o índice de limpidez atmosférica. Com o índice de limpidez atmosférica e a radiação incidente na superfície, as componentes direta e difusa da radiação são encontradas.

As radiações diretas e difusas indicadas na superfície são utilizadas para definir a radiação direta no painel, ou seja, no plano referente ao ângulo de declinação. E a radiação difusa no painel é calculada pelo cosseno deste mesmo ângulo conforme equação apresentada na equação 34 do capítulo 4. Com a radiação direta no painel se determina o índice de reflexão do vidro do painel solar e o albedo local. Assim, obtém-se a radiação total incidente sobre o painel solar.

### 6.2.3 Determinação do consumo e produção do sistema

A temperatura e a velocidade do vento são os fatores que auxiliam na determinação da temperatura do painel solar, a qual possui influência direta sobre a produção do painel

(CANADIAN, 2017; TAMIZHMANI, JI, *et al.*, 2003). Devido a isso, calculou-se a temperatura do painel solar e aplicou-se na influência da mesma sobre um painel fotovoltaico padrão, obtido em (CANADIAN, 2017). Assim, definiu-se a partir da radiação e temperatura do painel o fator de produção ( $FP$ ). A partir das equações de incidência no painel e eficiência dos módulos apresentadas no capítulo 4, foi adaptada a equação a seguir.

$$FP = \frac{\hat{i}_{pv}[1 - K_{pv}(\hat{t}_{pv} - 25)]}{1000} \quad (41)$$

Para encontrar a potência utiliza-se a seguinte equação

$$\hat{p} = i_{mppt} v_{mppt} * FP \quad (42)$$

Com a utilização desses cálculos, criou-se uma tabela de fator de produção para todos os dias do ano, podendo assim efetuar os cálculos para variadas potências de painel solar, facilitando assim o dimensionamento dos mesmos.

### 6.3 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE MÉDIAS MENSAIS

A partir dos cálculos apresentados no capítulo 3 dessa dissertação, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico baseado nas médias mensais pode ser executado. O consumo da luminária é determinado e, em posse desse, efetua-se o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos e do banco de baterias.

#### 6.3.1 Consumo do sistema

O consumo do sistema será calculado considerando 13 horas e 54 minutos de utilização média da luminária por noite. Esse valor é obtido no capítulo 3 a partir da média de horas noturnas no período de 30 dias que circunda o solstício de inverno. Logo, o consumo considerado nesse dimensionamento é de 833,4Wh/noite.

$$\text{Consumo (Wh)} = 13,89h * 60W = 833,4 Wh \quad (43)$$

#### 6.3.2 Dimensionamento da potência de geração

Para dimensionar a potência de geração necessária, utilizam-se os valores de consumo, rendimento e radiação solar descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros para cálculo do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos.

Parâmetro	Valor
Consumo	833,4 Wh
Rendimento do sistema ( $\eta$ )	80%
Radiação solar diária	3,56 kWh/m <sup>2</sup>

Fonte: Autor.

Assim, calcula-se o consumo corrigido, as horas de sol pleno e a potência de geração necessária.

$$\text{Consumo Corrigido (Wh)} = \frac{833,4Wh}{0,80} = 1.041,75 Wh \quad (44)$$

$$SP = \frac{3,56 \left(\frac{kWh}{m^2}\right)}{1 \left(\frac{kWh}{m^2}\right)} = 3,56 \quad (45)$$

$$\text{Potência Necessária (Wp)} = \frac{1111,2}{3,56} = 292,62 Wp \quad (46)$$

Corrigindo a potência necessária utilizando o fator de correção do painel de 90% (IMHOFF, 2007), o valor de 325,13Wp é obtido. Assim, nesse método de dimensionamento conclui-se que um painel de 330Wp pode ser adotado para a aplicação.

$$\text{Potência Corrigida} = \frac{292,62}{0,9} = 325,13 Wp \quad (47)$$

### 6.3.3 Dimensionamento do banco de baterias

O banco de baterias tem ligação direta com a autonomia desejada para o sistema. Como nos sistemas comerciais a autonomia comumente adotada é de 3 dias (ECOEFICIENTES, 2017; ECOFORCE, 2017; JOVIC, 2017; NEOSOLAR, 2017), será desejada a mesma autonomia para esse sistema. Entretanto, como considerado no consumo o período de horas de noite será de 13 horas e 54 minutos. Assim, a autonomia do sistema deverá ser de aproximadamente 41 horas e 40 minutos.

$$\text{Autonomia} = 13,89 * 3 \quad (48)$$

$$\text{Autonomia} = 41,67 \text{ horas} \quad (49)$$

Para esta análise é considerada o limite de descarga do banco de baterias em 80% (VICTRON-ENERGY, 2017), ou seja, 20% da carga não pode ser utilizada para não comprometer a vida útil do mesmo.

$$Capacidade\ das\ baterias = \frac{60W}{0,95 * 0,98} * 41,67h = 3,36kWh \quad (50)$$

Assim o sistema dimensionado pelo método de dimensionamento baseado nas médias mensais e anuais indica um painel solar de 330Wp com um banco de baterias de 3,4kWh.

#### 6.3.4 Análise de dimerização para o método de médias mensais

Com o sistema dimensionado, e a partir da tabela com as informações de produção e consumo, foram analisadas as estratégias de dimerização, propostas no capítulo 5, para o período de 11 anos estudado. A influência da dimerização da lâmpada no número de dias em que a mesma não teve energia para funcionar foi analisada, com isso obteve-se um histórico de dimerização no período estudado, além de comparativos entre as estratégias de dimerização e o sistema não dimerizado. A Tabela 9 apresenta quantos dias a lâmpada trabalhou em cada nível de dimerização, bem como o número de vezes que a lâmpada apagou ao utilizar as estratégias de dimerização apresentadas. Como a lâmpada não apagará já no início da noite, o número de dias de lâmpada apagada é independente dos demais. As especificações de cada estratégia de dimerização são apresentadas no capítulo 5, sendo elas:

1. Dimerização Linear (DL).
2. Linear abaixo de 75% (Lin75).
3. Linear abaixo de 50% (Lin50).
4. Escalonada (50/100) (E50100).
5. Escalonada (30/60/100) restritiva (ER).
6. Escala de 10 (E10).
7. Escala de 20 (E20).
8. Fixa 50/50 (50/50).
9. Não dimerizado (N/D).

Tabela 9: Comportamento do sistema para as cada dimerização considerando painel solar de 330Wp e banco de baterias de 3,4kWh.

	DL	Lin75	Lin50	E50100	ER	E10	E20	50/50	N/D
<b>Apagou</b>	1	1	5	79	1	1	12	115	379
<b>0-30%</b>	24	28	110	0	9	51	0	0	0
<b>30-40%</b>	68	75	132	0	0	59	0	0	0
<b>40-50%</b>	112	123	150	0	0	109	180	0	0
<b>50-60%</b>	149	151	0	430	1177	137	0	0	0
<b>60-70%</b>	228	226	0	0	0	194	254	0	0
<b>70-80%</b>	295	126	0	0	0	254	0	4380	0
<b>80-90%</b>	313	0	0	0	0	287	464	0	0
<b>90-100%</b>	3191	3286	3623	3585	2829	2924	3117	0	4380

Fonte: Autor.

Observa-se que o sistema dimensionado pelo método de médias mensais apresenta desempenho indesejado na maioria dos métodos de dimerização. Quando não dimerizado, praticamente em um ano inteiro do período estudado, o sistema apresenta falha. Contudo, o sistema apresenta raras falhas na dimerização escalonada (30/60/100) restritiva e na dimerização linear.

O sistema dimensionado pelo método das médias mensais pode ser aplicado, principalmente quando a estratégia de dimerização correta é adotada. Por outro lado, um dimensionado pelas médias mensais pode ser arriscado quando não há um mecanismo de escolha da estratégia de dimerização ou quando o sistema não será dimerizado.

### 6.3.5 Dimensionamento das baterias para cada método de dimerização

Considerando o painel solar dimensionado considerando o valor médio mensal de produção e consumo de energia, de 330Wp, fixou-se o valor do mesmo e na tabela da de testes das dimerizações propostas e com isso obteve-se o menor banco de baterias aceitável para cada uma das estratégias de dimerização. Na Tabela 10 é apresentado esse comparativo, onde o valor do menor banco de baterias aceitável é apresentado bem como o comportamento da dimerização para o mesmo. A definição do menor banco de baterias aceitável se deu pelo menor tamanho no qual o sistema não apresentou falta de energia ao amanhecer em todo o período estudado.

Tabela 10: Dimensionamento do banco de baterias com o sistema dimerizado.

	DL	Lin75	Lin50	E50100	ER	E10	E20	50/50	N/D
Banco de Baterias	3,5kWh	3,7kWh	4,0kWh	6,9kWh	3,6kWh	4,1kWh	5,5kWh	9,8kWh	31,2kWh
Apagou	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0-30%	21	17	64	0	7	24	0	0	0
30-40%	67	70	139	0	0	51	0	0	0
40-50%	108	127	147	0	0	100	79	0	0
50-60%	148	147	0	273	1179	128	0	0	0
60-70%	218	201	0	0	0	170	224	0	0
70-80%	305	140	0	0	0	283	0	4380	0
80-90%	324	0	0	0	0	325	475	0	0
90-100%	3189	3313	3665	3742	2829	2934	3237	0	4380

Fonte: Autor.

Utilizando a tabela para dimensionar o banco de baterias é possível analisar a variabilidade do mesmo em relação ao método de dimerização adotado. Enquanto o método de dimerização linear apresenta um banco de baterias de 3,5kWh, quando o sistema não é dimerizado, o mesmo precisa de um banco de baterias de 31,2kWh para que não ocorram faltas de energia na carga. Essa diferença de quase 9 vezes no tamanho do banco de baterias é significativa, e demonstra a necessidade da utilização de estratégias de dimerização nesse tipo de sistema.

De maneira geral, os sistemas com dimerização mais dinâmica, que acompanham com maior fidelidade o nível de carga do banco de baterias apresentaram valores de banco de baterias similar ao sistema dimensionado via cálculo.

#### 6.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA A PARTIR DO MÉTODO DE ANÁLISE DA DINÂMICA DIÁRIA

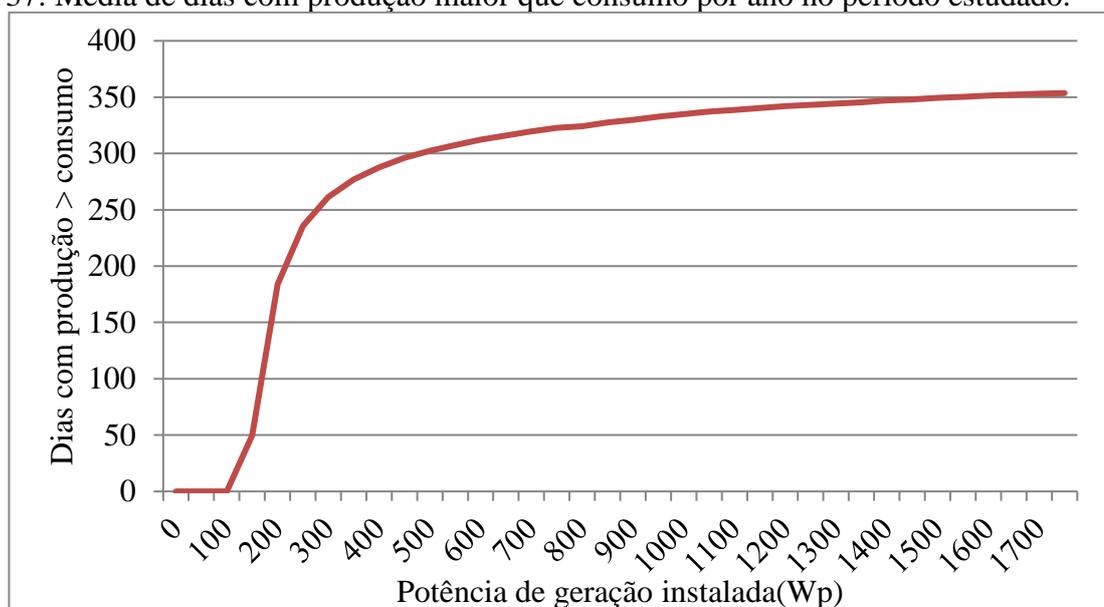
Fazendo uso da tabela de dinâmica diária de geração e consumo do sistema, foi elaborada uma estratégia de dimensionamento ideal para essa aplicação. Assim foram feitos o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos e do banco de baterias que apresentassem melhores ganhos para o sistema sem aumentar em equivalência sua capacidade. Obtendo assim o melhor custo-benefício possível de dimensionamento.

##### 6.4.1 Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos

Para dimensionar os painéis solares o fator de produção de cada dia do período de 11 anos foi considerado. O dimensionamento foi realizado por análise da produção e consumo no

decorrer desse período. Para cada tamanho de painel foi analisada a média do número de dias em que a produção seja maior que o consumo. Assim, é possível determinar quantos dias o banco de baterias será carregado ou descarregado. Ao fazer essa análise, o gráfico da Figura 37 é obtido.

Figura 37: Média de dias com produção maior que consumo por ano no período estudado.



Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Figura 37, conforme há um acréscimo na potência instalada de painéis solares, a média de dias em que a produção é maior do que o consumo é acrescida. Esta relação não é linear e até a potência de 300Wp o ganho é consideravelmente alto, média de aproximadamente 0,80 dias/Wp, entretanto, quando a potência ultrapassa os 800 Wp esta variação já apresenta um ganho de 0,02 dias/Wp. Para que a produção seja maior que o consumo em todos os dias do ano no período estudado, seria necessária uma potência maior que 13kWp.

Esta estratégia de dimensionamento do sistema apresenta como principal característica a maior flexibilidade do projetista efetuar o dimensionamento a partir do gráfico. Nesse caso de estudo, valores menores que 300Wp não são recomendados. O sistema pode ser dimensionado com maior quantidade de painéis quando se deseja um menor banco de baterias, ou com menos painéis quando se possui um banco de baterias maior, pois essa relação tem ligação direta ao custo do sistema. Por outro lado, quando o aumento da potência não apresenta ganhos significativos de dias de produção maior que consumo, um acréscimo do banco de baterias pode suprir essa necessidade.

A potência escolhida nesse dimensionamento foi de 550Wp. Pode ser obtida a partir de 2 painéis solares de 275Wp, conforme apresentados na Tabela 11: Características técnicas do painel dimensionado. (CANADIAN, 2017). Com essa potência instalada, no período estudado obteve-se uma média de aproximadamente 83% dos dias do ano com produção maior que o consumo. Por outro lado, aumentar a potência em 50Wp nesta configuração acarreta em acréscimos abaixo de 1% o que é um ganho baixo para um aumento grande de área de ocupação e custo do painel (CANADIAN, 2017).

Tabela 11: Características técnicas do painel dimensionado.

<b>Fabricante</b>	Canadian Solar
<b>Modelo</b>	CS6K-275M
<b>Tensão de operação (Vmp)</b>	31.3 V
<b>Corrente de operação (Imp)</b>	8.80 A
<b>Eficiência</b>	16,8%
<b>Temperatura de operação</b>	-40°C ~ +80°C
<b>Dimensões</b>	(1650 x 992 x 40)mm
<b>Tipo de células</b>	Monocristalinas
<b>Coefficiente de temperatura (Pmax)</b>	-0,41% / °C

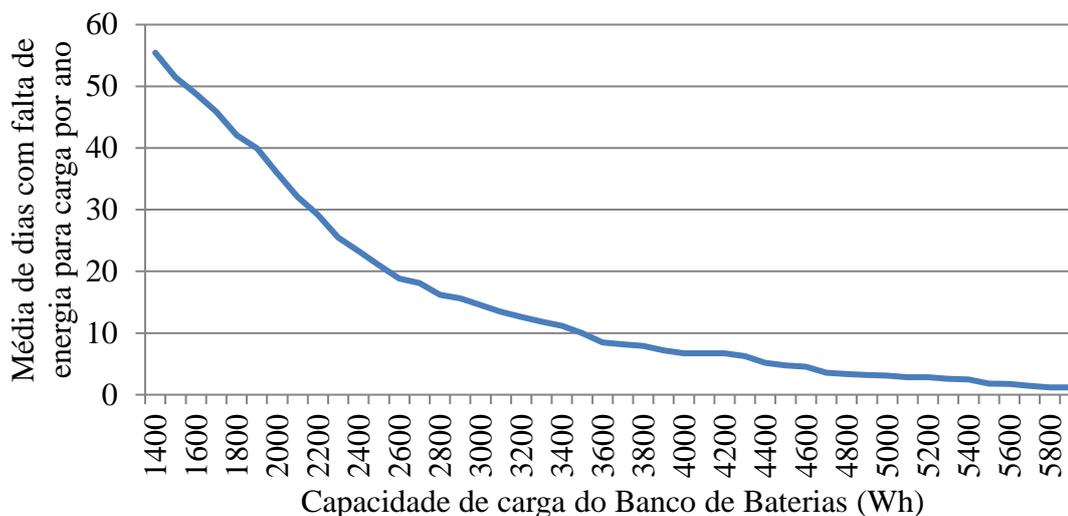
Fonte: (CANADIAN, 2017).

#### 6.4.2 Dimensionamento do banco de baterias

Com os painéis dimensionados, o dimensionamento do banco de baterias pode ser realizado de forma similar. O primeiro passo foi simular sistemas com a potência de painéis escolhida, variando a capacidade de carga do banco de baterias de 1,4kWh até 5,9kWh. Iniciando em 1,4kWh, pois este é o valor mínimo necessário para garantir energia a uma carga de 60W com 75% de perdas durante todas as horas de noite no dia relativo ao solstício de inverno, sem ultrapassar a profundidade de 80% de descarga do banco de baterias (VICTRON-ENERGY, 2017).

Para que haja iluminação em todo período estudado, sem que seja feita dimerização, com uma potência instalada de 550Wp, o banco de baterias necessita ter a potência de 8,7kWh, valor obtido pela extrapolação do gráfico da Figura 38.

Figura 38: Média anual de dias com bateria completamente descarregada em relação à capacidade de carga adotada.



Fonte: Autor.

O gráfico apresentado demonstra o comportamento tendendo à zero, e um ponto de deflexão por volta dos 3,2kWh de capacidade de baterias. Esse ponto indica que um número maior de baterias não representará mais um ganho significativo de dias sem iluminação, ou seja, que em algum ponto no período da noite a lâmpada se apague.

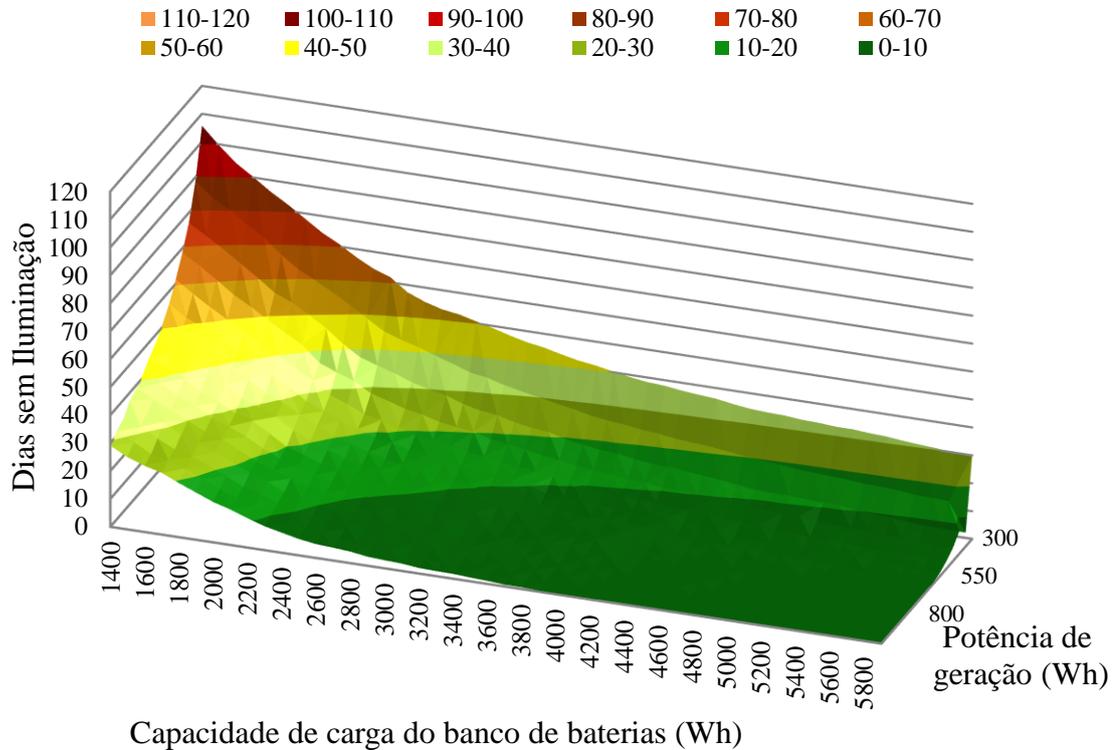
A escolha do banco de baterias para esse caso do estudo foi de 3,6kWh uma vez que abaixo deste valor o número de dias sem iluminação no período de um ano considerando o valor médio do período estudado, é de menos de 9 dias/ano, sem dimerização. Além disso, para valores maiores de 3,6kWh se torna cada vez menos vantajoso o aumento da carga.

Com isso, o dimensionamento do banco de baterias a partir da dinâmica de produção e consumo resultou em um banco de baterias de 3,6kWh, mesmo valor obtido quando realizado o dimensionamento pelo método das médias mensais. Por outro lado, esse método de dimensionamento possibilita flexibilizar o projeto do sistema a partir de gráficos de comparação entre o tamanho do banco de baterias e de painéis solares com o número de dias dimerizados.

#### 6.4.2.1 Extrapolação dos dados

Para demonstrar essa flexibilidade, se realizou uma análise de bancos de baterias de 1,4kWh até 6kWh de capacidade, para uma potência de geração de 300Wp à 1000Wp. O resultado obtido é apresentado no gráfico da Figura 39.

Figura 39: Dias sem iluminação em relação à capacidade de carga do banco de baterias e à potência de geração fotovoltaica.



Fonte: Autor.

No gráfico é apresentada a relação entre os dias sem energia suficiente no período de 1 ano, na média dos 11 anos estudados, com a variação do painel e do banco de baterias. É possível dimensionar o sistema de forma que o mesmo possua boas características de confiabilidade variando questões como o custo, espaço físico para instalação, dentre outros. Pode-se observar, por exemplo, que para um painel de 350Wp e um banco de baterias de 5,9kWh obtêm-se 5 dias com falta de energia, o mesmo valor pode ser encontrado com 850Wp de potência instalada com uma bateria de 3,1kWh, ou seja, um aumento da potência de painéis possibilita a utilização de um banco de baterias menor. Representa bem a flexibilidade que o projetista tem para realizar um projeto fotovoltaico autônomo a partir desse método de dimensionamento.

Nesse gráfico podem ser comparados os dois métodos de dimensionamento sendo o primeiro, baseado nas médias, com um painel de 330Wp e um banco de baterias de 3,4kWh. O método que utiliza a dinâmica diária resultou em um painel de 550Wp e um banco de baterias de 3,6kWh.

Para o primeiro método obteve-se 30,55 dias sem dimerização enquanto o segundo apresentou 8,45, uma diferença de mais de 360%. Isso se deve ao fato de que uma maior

potência de geração instalada, proporciona ao sistema recarregar o banco de baterias mesmo em dias com menores taxas de radiação, com isso um banco de baterias menor pode ser instalado.

#### 6.4.3 Análise de dimerização para o sistema dimensionado a partir da tabela de geração e consumo

Para um painel solar de 550Wp e um banco de baterias de 3,6kWh, o sistema apresentou os resultados da Tabela 12 para as dimerizações propostas. Observa-se que, conforme já esperado, os resultados são melhores que os apresentados com o sistema dimerizado para um painel de 330Wp. Sendo que para dimerização linear, que apresentou os melhores resultados os dias dimerizados diminuiram 5 vezes, enquanto para o sistema sem dimerização o número de dias em que o sistema apresentou falhas caiu abaixo da metade.

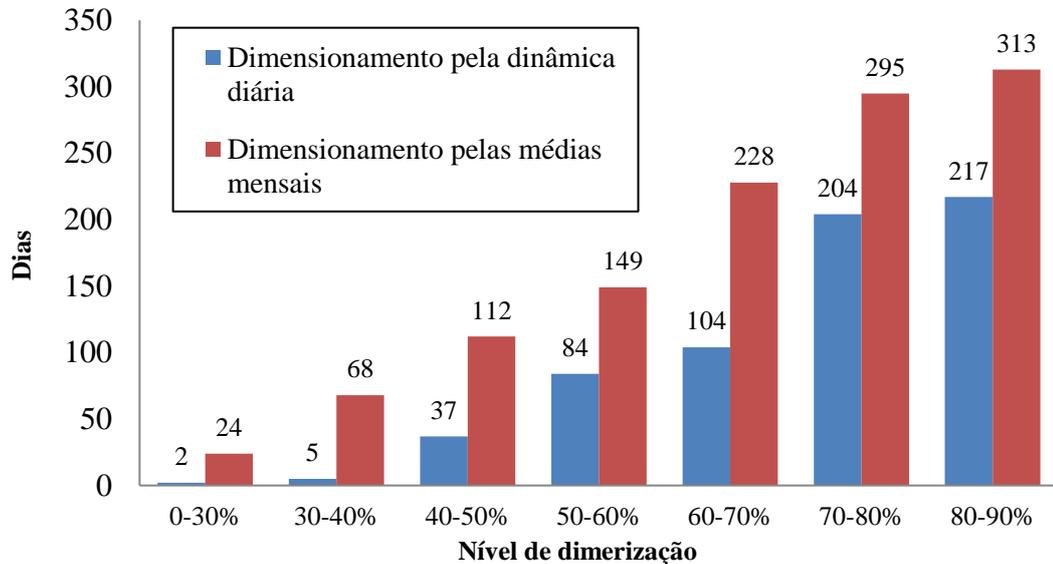
Tabela 12: Comportamento do sistema para as cada dimerização considerando painel solar de 330Wp e banco de baterias de 3,6kWh, no período de 11 anos.

	DL	Lin75	Lin50	E50100	ER	E10	E20	50/50	N/D
<b>Apagou</b>	0	0	0	1	0	0	1	9	102
<b>0-30%</b>	2	2	12	0	0	2	0	0	0
<b>30-40%</b>	5	10	61	0	0	14	0	0	0
<b>40-50%</b>	37	47	70	0	0	39	35	0	0
<b>50-60%</b>	84	101	0	152	763	74	0	0	0
<b>60-70%</b>	104	113	0	0	0	121	129	0	0
<b>70-80%</b>	204	94	0	0	0	182	0	4380	0
<b>80-90%</b>	217	0	0	0	0	203	316	0	0
<b>90-100%</b>	3727	4013	4237	4228	3617	3745	3900	0	4380

Fonte: Autor.

Em quase todas as estratégias de dimerização o sistema apresentou poucos dias com dimerização, com exceção da estratégia fixa, esta apresentou uma taxa maior de falhas. Quando comparados os dois métodos de dimensionamento pelo método de dimerização linear o gráfico da Figura 40 é obtido. É possível observar que o dimensionamento utilizando a tabela tem resultados melhores principalmente em relação a dimerizações mais agressivas, abaixo dos 50%. Nas dimerizações até 40% observa-se uma diferença de mais de dez vezes no número de dias dimerizados.

Figura 40: Comparativo dos resultados de dimerização linear por ambos métodos de dimensionamento.



Fonte: Autor.

#### 6.4.4 Dimensionamento das baterias para cada método de dimerização

Quando dimensionado o banco de baterias, para cada uma das estratégias de dimerização, utilizando dois painéis de 275Wp, os valores encontrados são observados na Tabela 13. O banco de baterias encontrado quando dimerizado é significativamente menor, sendo de até 1,1kWh para algumas estratégias de dimerização.

Tabela 13: Dimensionamento do banco de baterias e comportamento do sistema dimerizado para o sistema dimensionado com 2 painéis de 275Wp.

	DL	Lin75	Lin50	E50100	ER	E10	E20	50/50	N/D
<b>Banco de Baterias</b>	2,5kWh	2,5kWh	3,3kWh	4,9Wh	2,6Wh	3,0kWh	3,8kWh	4,9kWh	8,7kWh
<b>Apagou</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>0-30%</b>	12	13	20	0	4	10	0	0	0
<b>30-40%</b>	26	35	64	0	0	18	0	0	0
<b>40-50%</b>	80	89	78	0	0	66	29	0	0
<b>50-60%</b>	103	103	0	95	759	74	0	0	0
<b>60-70%</b>	147	147	0	0	0	140	122	0	0
<b>70-80%</b>	177	93	0	0	0	179	0	4380	0
<b>80-90%</b>	137	0	0	0	0	171	310	0	0
<b>90-100%</b>	3698	3900	4218	4285	3617	3722	3919	0	4380

Fonte: Autor.

Comparando os bancos de baterias para a estratégia de dimerização linear quando o banco de baterias é dimensionado para tal, observa-se que o sistema com 2 painéis de 275Wp

apresenta melhores resultados, mesmo que esse seja mais custoso devido ao aumento das estruturas, relacionados ao uso de 2 painéis no lugar de 1. Como o banco de baterias é o item do sistema com maior custo (ASSUNÇÃO, 2016; BUCHHOLZ e STYCZYNSKI, 2014), principalmente considerando sua vida útil e número de ciclos (VICTRON-ENERGY, 2017) a diminuição de 1kWh é relevante para o projeto. O comparativo de ambos projetos pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14: Sistemas projetados para dimerização linear.

	<b>Painel Solar</b>	<b>550Wp</b>	<b>330Wp</b>
	<b>Banco de Baterias</b>	<b>2,5kWh</b>	<b>3,5kWh</b>
	Apagou	0	0
Nível de dimerização	0-30%	12	21
	30-40%	26	67
	40-50%	80	108
	50-60%	103	148
	60-70%	147	218
	70-80%	177	305
	80-90%	137	324
	90-100%	3698	3189

Fonte: Autor.

## 6.5 CONCLUSÃO

Com as informações de dimensionamento estudadas no capítulo 3, foi dimensionado o sistema de iluminação a partir das médias de horas mensais e de radiação solar em Santa Maria/RS no período crítico para o sistema, que compreende o mês do solstício de inverno no hemisfério sul. Obteve-se por esse método um painel solar de 330Wp e um banco de baterias de 3,6kWh, para suprir uma lâmpada de iluminação pública de 60W.

O comportamento desse sistema para cada uma das estratégias de dimerização apresentadas no capítulo 5. Essa análise demonstrou que o sistema necessita de dimerização, ao apresentar 353 dias com falta de energia para a carga no período estudado, quando considerado o sistema sem dimerização. Entretanto, quando utilizado o método adequado de dimerização o sistema apresentou comportamento satisfatório, sem nenhuma falha no sistema durante o período simulado.

Diferentes estratégias de dimerização necessitam de tamanhos diferentes de bancos de baterias, para isso fixou-se a potência de geração em 330Wp e, a partir dessa, foi encontrado o

valor mínimo de banco de baterias necessário para que o sistema não apresente falhas. Assim, foram encontrados bancos de baterias de 3,5kWh até 9,8kWh, para sistemas dimerizados e de 31,2kWh para o sistema sem dimerização.

Fazendo uso das informações diárias de geração e consumo do sistema, o mesmo foi dimensionado para os pontos com melhor custo-benefício. Assim, dimensionou-se um sistema com 550Wp de geração e 3,6kWh de capacidade de carga do banco de baterias. Esse sistema apesar do custo-benefício de cada componente, precisa ser analisado dentro do conjunto, uma vez que ao utilizar dois painéis solares possui uma elevação no custo de estruturas de fixação.

A mesma análise realizada para o dimensionamento a partir das médias mensais foi realizada para o sistema baseado na dinâmica de produção e consumo. Quando aliado a uma estratégia de dimerização adequada, apresentou excelentes resultados, quase não tendo ocasiões de dimerização abaixo dos 50% da potência nominal e sem ocorrências de falta de energia no período estudado.

Para determinar o banco de baterias adequado a cada estratégia de dimerização o critério de dias com falta de energia foi adotado, além disso, a potência de geração foi fixada em 550Wp. Assim obteve-se uma capacidade de carga variando de 2,5kWh até 4,9kWh, valores significativamente menores que os encontrados para um painel de 330 Wp.

A estratégia de dimensionamento apresentada neste trabalho demonstrou melhores resultados quando comparada ao método de médias, tradicionalmente adotado para dimensionar sistemas fotovoltaicos autônomos. Mesmo a utilização de 2 painéis solares é justificada devido a diminuição do banco de baterias e a maior capacidade do sistema de recuperação, diminuindo os dias com dimerização da luminária. Considerando o banco de baterias como o item de maior custo do sistema, a utilização de dois painéis é recomendada nessa aplicação.

Conforme apresentado no capítulo 2, apesar das porcentagens apresentadas com relação à dimerização proposta, a redução da luz produzida pela luminária não é diretamente proporcional à redução da potência. Uma vez que, a eficácia da luminária vai aumentar tanto pela redução do efeito droop (LUN, LOO, *et al.*, 2009), quanto pela diminuição da temperatura da luminária pela dimerização (BENDER, 2012). Além disso, como a dimerização ocorre majoritariamente no inverno, a temperatura ambiente menor também influencia na luz produzida. Porém, para saber exatamente quanto será a luz produzida para cada nível de dimerização, é preciso saber o modelo do LED, ponto de operação e valor da resistência térmica da luminária. No entanto, essa determinação está fora do escopo dessa dissertação.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÃO GERAL

Visando um método de dimensionamento de sistemas autônomos fotovoltaicos de iluminação pública que apresentasse alto índice de confiabilidade com uma relação de custo benefício coerente, esse trabalho apresentou o método de dimensionamento baseado na dinâmica diária de geração de energia durante o dia e consumo de energia durante a noite, dentro de um período de 11 anos, analisando assim um período que abrangesse um ciclo solar completo. Com isso foi elaborado um dimensionamento no qual fenômenos climáticos cíclicos foram considerados e pôde-se testar o sistema dimensionado através de simulação do período que compreende os anos de 2002 a 2013.

O estudo bibliográfico dos sistemas autônomos fotovoltaicos de iluminação pública demonstrou que a aplicação em série, utilizando lâmpadas LED possibilita a utilização de conversores CC-CC de alta eficiência. Foi apresentado também que para essa aplicação, a bateria de Íons de Lítio apresenta as melhores características quando comparada a outras opções comuns do mercado. Já sobre o carregador a ser utilizado, foi analisada a importância de um circuito de proteção para o banco de baterias e a necessidade do rastreamento do ponto de máxima potência (MPP) para garantir o máximo aproveitamento da potência de geração dos painéis solares. A importância da dimerização e os ganhos de eficácia quando a mesma é aplicada foram estudados e apresentados, caracterizando que a dimerização da potência aplicada ao LED resulta em uma dimerização de menor valor da luminosidade da lâmpada.

Para dimensionar o sistema autônomo de iluminação pública foi elaborada uma tabela de simulação com as informações de 11 anos de geração e consumo de um sistema, para garantir que a ocorrência do ciclo solar não interferisse nos resultados obtidos. Os dados meteorológicos utilizados na simulação foram obtidos através do banco de dados históricos do INMET, o qual possui uma rede de 500 estações espalhadas por todo o território nacional. Possibilitando a aplicação desse método em outras localidades dentro do país. Todos os dados obtidos foram processados para que se obtivesse a capacidade de geração fotovoltaica mais próxima possível da realidade. Em teste realizado a tabela apresentou conformidade de valores de produção de energia real e simulada a partir desse método.

Para testar os métodos de dimensionamento foram determinadas estratégias de dimerização, baseadas na carga do banco de baterias ao anoitecer. Assim, a luminária assume um nível de dimerização durante todo o período da noite, de acordo com o nível de carga do

banco de baterias antes de iniciar o consumo. Para análise dos métodos de dimensionamento foi elaborada a tabela de consumo e produção diária de energia. Nessa tabela é possível simular o comportamento do sistema no período estudado. Com a posse das informações de consumo e produção do sistema, foram realizadas simulações para cada dimensionamento em cada uma das dimerizações apresentadas, bem como para o sistema sem dimerização.

O dimensionamento do sistema pelo método das médias mensais apresentou um sistema de 330Wp e um banco de baterias de 3,6kWh. Já o sistema baseado na análise dos dados da tabela apresentou um painel de 550Wp para a mesma capacidade de carga de 3,6kWh. Os resultados das estratégias de dimerização demonstraram que o aumento da potência de geração traz um ganho significativo na capacidade de recuperação da carga do banco de baterias, fazendo com que essa possa ser recarregada mesmo em dias com baixa radiação solar.

A utilização de dois painéis fotovoltaicos tem como desvantagem o aumento da estrutura de fixação, principalmente devido à área ocupada pelos painéis e a necessidade de resistir a fortes ventos. Apesar disso, a utilização de dois painéis diminuiu consideravelmente a capacidade de carga do banco de baterias necessária, e uma vez que, o banco de baterias é o item mais custoso o uso de dois painéis pode ser considerado.

Possuir uma tabela de análise e simulação do sistema possibilitou verificar o comportamento do mesmo para cada estratégia de dimerização, dentro de cada método de dimensionamento. A possibilidade de simular o funcionamento do sistema fornece um ganho considerável, desde a escolha dos componentes do sistema até a escolha da melhor estratégia de dimerização a ser adotada.

Apesar de ser um método de dimensionamento que demande muitos cálculos e coleta de dados, além de capacidade elevada de processamento de todos os dados, o dimensionamento utilizando a dinâmica diária se mostrou eficaz para a aplicação proposta. Por outro lado, o método de dimensionamento comumente adotado em sistemas autônomos fotovoltaicos apresentou-se não suficientemente bom para dimensionar um sistema fotovoltaico de iluminação, principalmente devido à instabilidade da geração no mesmo período em que o consumo é elevado.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado nesse trabalho abre possibilidades na área de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos. Pode ser realizada, uma reformulação dos cálculos de

dimensionamento baseados nas médias mensais, onde os painéis solares sejam acrescidos para garantir maior potencial de geração. Esse estudo associaria as características de confiabilidade do método proposto nesse trabalho a simplicidade do método tradicionalmente adotado.

Também é viável a compilação dessas informações para a criação de um software de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, uma vez que a tabela apresenta informações históricas de geração, que podem ser utilizadas de inúmeras formas. Estudos de geração por períodos do ano, gráficos de projeto com maiores níveis de confiabilidade, além de estudos de dinâmica de produção e consumo, como os apresentados nesse trabalho, aplicados em outras situações.

### 7.3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA RESULTANTE DO TRABALHO

BANDEIRA, R. H. ; DALLA COSTA, M. A. . ; MICHELS, L; REITER, R. D. de O. Metodologia de projeto de sistemas autônomos fotovoltaicos de iluminação considerando a variação da radiação solar ao longo do ano. **10th Seminar on Power Electronics and Control - SEPOC**, 2017, Santa Maria-RS.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- AIFANTIS, K. E.; HACKNEY, S. A.; KUMAR, R. V. **High energy density lithium batteries: materials, engineering, applications**. [S.l.]: WILEY-VCH, 2010.
- ALDO. Aldo Componentes Eletronicos LTDA. **Paineis Solares - Aldo componentes**, 2017. Disponível em: <<http://www.aldo.com.br/Produto/Pesquisa/?categorias=9-206-2;9-206-1>>. Acesso em: Setembro 2017.
- ASSUNÇÃO, A. R. S. **Viabilidade Técnica e Económica da Reutilização de Baterias de Veículos Elétricos Integradas com Sistemas Fotovoltaicos no Sector Residencial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, p. 94. 2016.
- B&B-POWER. MOSO B&B. **SF3000TL "A" Class from Photon**, 2014. Disponível em: <<http://www.bbpower.cn/ompanynews/108-54.html>>. Acesso em: Janeiro 2018.
- BARRETO, R. L. **Contribuições ao método de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 85. 2014.
- BATTERY-UNIVERSITY. Battery University. **BU-807: How to Restore Nickel-based Batteries**, 2016. Disponível em: <[http://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_restore\\_nickel\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_restore_nickel_based_batteries)>. Acesso em: 2017.
- BATTERY-UNIVERSITY. Battery University. **BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries**, 2017. Disponível em: <[http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)>. Acesso em: Outubro 2017.
- BATTERY-UNIVERSITY. Battery University. **BU-201b: Gel Lead Acid Battery**, 2017. Disponível em: <[http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_201b\\_gel\\_lead\\_acid\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_201b_gel_lead_acid_battery)>. Acesso em: 2017.
- BATTERY-UNIVERSITY. Battery University. **BU-204: How do Lithium Batteries Work?**, 2017. Disponível em: <[http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)>. Acesso em: Novembro 2017.
- BECHERIF, M. et al. Hybridization of fuel cell, solar panel and batteries on the DC link for street lighting application. **IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, p. 2795-2802, Novembro 2010.
- BENDER, V. C. **Metodologia de projeto eletrotérmico de LEDs aplicada ao desenvolvimento de sistemas de iluminação pública**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 201. 2012.
- BLASSE, G.; BRIL, A. A new phosphor for flying-spot cathode-ray tubes for color television: yellow emitting Y3Al5O12-Ce3+. **Applied Physics Letters**, v. 11, n. 2, Novembro 2004.
- BORGES, R. C. D. M. Cálculo do Nascer e Pôr do Sol. **Instituto de Informática - UFRGS**, 2016. Disponível em: <[http://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Nascer\\_Por\\_Sol.html](http://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Nascer_Por_Sol.html)>. Acesso em: Junho 2017.
- BUCHHOLZ, B. M.; STYCZYNSKI, Z. **Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks**. 1ª. ed. [S.l.]: Springer Vieweg, 2014.
- BULLOUGH, J. D. Lighting Answers: Light Emitting Diode Lighting Systems. **National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center**, Rensselaer Polytechnic Institute, v. 7, 2003.
- CANADIAN, S. Maxpower CS6U-M datasheet, 2017. Disponível em: <[https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/datasheets/en/new/Canadian\\_Solar-Datasheet-MaxPower\\_CS6U-M\\_\\_1500V\\_\\_en.pdf](https://www.canadiansolar.com/fileadmin/user_upload/downloads/datasheets/en/new/Canadian_Solar-Datasheet-MaxPower_CS6U-M__1500V__en.pdf)>. Acesso em: Setembro 2017.

- CARDOZO, R. T. **Método de carga para banco de baterias em fontes ininterruptas de energia que busca garantir o estado de carga completa: corrente pulsada modificado.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, p. 84. 2016.
- CARERIZO, E. A. **Instalaciones solares fotovoltaicas.** 4<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Progenza Editorial, 2008.
- CEPEL-CRESESB. Cepel Cresesb. **Manual de Engenharia Fotovoltaica**, 2014. Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: Novembro 2017.
- CEPEL-CRESESB. Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Potência solar - SUNDATA.**, 2017. Disponível em: <[www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)>. Acesso em: Outubro 2017.
- CERVI, M. **Rede de iluminação semicondutora para aplicação automotiva.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 106. 2005.
- CHAGAS, D. M. **Estudo sobre fatores contribuintes de acidentes de trânsito urbano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, p. 114. 2011.
- CHEN, L.-R. Design of duty-varied voltage pulse charger for improving Li-Ion battery-charging response. **Industrial Electronics, IEEE Transactions**, v. 56, p. 480-487, Agosto 2008.
- CHIU, H.-J. et al. A High-Efficiency Dimmable LED Driver for Low-Power Lighting Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, p. 735-743, Julho 2009.
- CHO, J. et al. White light-emitting diodes: History, progress, and future. **Laser & Photonics Reviews**, v. 11, n. 2, Março 2017.
- CIA, W. F. Central Intelligence Agency (CIA). **The World Factbook - South America - Brazil**, 2017. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/br.html>>. Acesso em: Maio 2017.
- CIEMAT. **Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energia solar fotovoltaica.** Madrid: CIEMAT, 1992.
- COPE, R. C.; PODRAZHANSKY, Y. The art of battery charging. **Battery Conference on Applications and Advances**, Janeiro 1999. 233-235.
- DALLA COSTA, M. A. et al. Autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs. **Industrial Technology (ICIT)**, Vina del Mar, Chile, 14-17 Março 2010.
- DAVIDSON, J.; ORNER, F. **New Solar Electric Home: The complete guide to photovoltaics for your home.** 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Aatec Publications, 2008.
- DRESCH, R. D. F. V. **Método de análise do estado de carga restante de baterias de celular.** Projeto de diplomação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 58. 2010.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 4<sup>a</sup>. ed. Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2013.
- DYBAS, C.; DRUMMOND, R. National Science Foundation. **Solar Cycle Linked to Global Climate**, 2009. Disponível em:  
<[https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=115207&govDel=USNSF\\_51](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=115207&govDel=USNSF_51)][<http://ambiente.kazulo.pt/9874/como-o-ciclo-solar-influencia-o-clima.htm>>. Acesso em: Janeiro 2018.
- DYBLE, M. et al. Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods. **Lighting Research Center - Rensselaer Polytechnic Institute**, Troy, Nova Iorque, 2005.

- ECOEFICIENTES. Ecoeficientes - Informações sobre técnicas para a construção sustentável. **Poste Solar Fotovoltaico LED**, 2017. Disponível em: <<http://ecoefficientes.com.br/guia-de-empresas/poste-solar-fotovoltaico-led/>>. Acesso em: Maio 2017.
- ECOFORCE. ECOFORCE. **Catálogo de produtos**, 2017. Disponível em: <<http://www.ecoforce.com.br/catalogo/CATALOGO-ECOFORCE.pdf>>. Acesso em: Maio 2017.
- ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 22, No. 2, Junho 2007. 439-449.
- EVANCZUK, S. Digi-Key Electronics. **Solar-Powered HB-LED Street Lighting**, 2012. Disponível em: <<https://www.digikey.it/en/articles/techzone/2012/aug/solar-powered-hb-led-street-lighting>>. Acesso em: Agosto 2017.
- FEMIA, N.; ZAMBONI, W. Photovoltaic-fed LED lighting system with SOC-based dimmable LED load. **IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, Montreal, Canadá, p. 1132-1137, Dezembro 2012.
- FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Instituto Politécnico de Bragança. [S.l.], p. 104. 2008.
- GARRIDO, E. L. **Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública**. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 100. 2010.
- GOMES, J. M. S. **Power-film: um filme flexível autônomo para alimentar dispositivos elétricos**. Dissertação de mestrado - Universidade do Minho. [S.l.], p. 121. 2012.
- HATHAWAY, D. H. The Solar Cycle. **NASA Ames Research Center**, Moffet Field, California, v. 12, Setembro 2015.
- HUA, C.-C.; LIN, M.-Y. A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles. **Industrial Electronics**, v. 1, p. 135-140, 2000.
- IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 146. 2007.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.**, 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: Maio 2017.
- INMETRO. Tabelas de consumo / Eficiência Energética. **Componentes Fotovoltaicos - Baterias - Edição 04/15**, 2015. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/componentes\\_fotovoltaicos\\_baterias.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/componentes_fotovoltaicos_baterias.pdf)>. Acesso em: Outubro 2017.
- JAIN, S.; AGARWAL, V. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems. **Electric Power Applications, IET**, vol. 1, no. 5, Setembro 2007. 753-762.
- JOVIC. Jovic Engenharia. **Poste Autônomo**, 2017. Disponível em: <<https://www.postesolar.eco.br/autonomo>>. Acesso em: Maio 2017.
- LABSOL. Laboratório de Energia Solar - LABSOL. **Radiasol 2**, 2017. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>>. Acesso em: Julho 2017.
- LEWIS, G. N.; KEYES, F. G. The potential of the lithium electrode. **Journal of the American Chemical Society**, v. 35, p. 340-344, Abril 1913.
- LI, J. J.; MURPHY, J. W.; KOHL, P. A. The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries. **Journal of power sources**, v. 102, p. 302-309, Dezembro 2001.
- LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. 3ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2001.

- LUN, W.-K. et al. Bilevel current driving technique for LEDs. **IEEE transactions for power electronics**, v. 24, n. 12, p. 2920-2932, Dezembro 2009.
- MARCELINO, R. P. M. **Controlo de Armazenamento de Energia em Barramento CC**. Relatório de Preparação da Dissertação - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 29. 2013.
- MELO, M. F. D. **Sistema de geração distribuída de energia fotovoltaica integrado a um sistema de iluminação pública à base de LEDs**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 145. 2014.
- MINAMI, T. et al. **Solid state ionics for batteries**. 1ª. ed. [S.l.]: Springer Japan, 2005.
- MOREIRA, M. C. **Utilização de conversores eletrônicos que alimentam LEDs de alto brilho na aplicação em tecido humano e sua interação terapêutica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 190. 2009.
- NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Fontes Alternativas de Energia), Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, p. 21. 2004.
- NEOSOLAR. NeoSolar. **Poste Solar Fotovoltaico - Iluminação Pública**, 2017. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/luminaria-solar-led/poste-solar-led.html>>. Acesso em: Maio 2017.
- NISHI, Y. Journal of power sources. [S.l.]: [s.n.], v. 100, 2001. p. 101-106.
- OZAWA, K. **Lithium Ion Rechargeable Batteries: Materials, Technology, and New Applications**. [S.l.]: WILEY-VCH, 2009.
- PEREZ, F. **Inserção e controle de armazenadores de energia em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 103. 2015.
- PESQUERO, N. C. et al. Materiais cerâmicos de inserção aplicados a baterias de íons de lítio. **Cerâmica**, v. 54, p. 233-244, Junho 2008.
- PHILIPS-LUMILEDS. Philips Lumileds. **Technology white paper: Understanding power LED lifetime analysis**, 2009. Disponível em: <[http://www.climateactionprogramme.org/images/uploads/documents/Philips\\_Understanding-Power-LED-Lifetime-Analysis.pdf](http://www.climateactionprogramme.org/images/uploads/documents/Philips_Understanding-Power-LED-Lifetime-Analysis.pdf)>. Acesso em: Agosto 2017.
- PINTO, R. A. **Sistemas eletrônicos para iluminação de exteriores empregando diodos emissores de luz (LEDs) alimentados pela rede elétrica e por baterias**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 254. 2012.
- REITER, R. D. D. O. **Análise e projeto de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos parcialmente sombreados**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 202. 2016.
- RISEN. Risen Solar Technology. **Products - Solar Panels**, 2018. Disponível em: <<http://www.risenenergy.com/en/products.php>>. Acesso em: Janeiro 2018.
- ROSOLEM, M. D. F. N. C. et al. Bateria de lítio-íon conceitos básicos e suas potencialidades. **Saber Eletrônica**, v. 8, p. 59-72, Jul/Dez 2012.
- SATO, Y.; TAKEUCHI, S.; KOBAYAKAWA, K. Cause of the memory effect observed in alkaline secondary batteries using nickel electrode. **Journal of Power Sources** **93**, p. 20\*24, Fevereiro 2001.
- SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**. 2ª. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006.
- SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 222. 2009.
- SERRÃO, M. A. D. S. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma casa de veraneio em Pousa da Cajaíba - Paraty**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 99. 2010.

- SIKHA, G. et al. Comparison of the capacity fade of Sony US 18650 cells charged with different protocols. **Journal of Power Sources**, v. 122, p. 67-76, 2003.
- SILSO. Sunspot Index and Long-term Solar Observations. **Monthly and smoothed sunspot number**, 2018. Disponível em: <<http://sidc.be/images/wolfmms.png>>. Acesso em: Janeiro 2018.
- SOUSA, T. L. D.; ZAMPERIN, J. L. B. Análise e dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid em um food truck. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Araçatuba, SP, p. 119-135, 2017.
- STEIGERWALD, D. A. et al. Illumination With Solid State Lighting Technology. **Selected Topics in Quantum Eletronics, IEEE Journal**, v. 8, p. 310-320, Março/Abril 2012.
- STOUCH-LIGHTING. Stouchlighting LED lighting Solutions. **Improvements in LED Efficiency Droop**, 2017. Disponível em: <<http://www.stouchlighting.com/blog/auger-effect-discovery-improves-understanding-of-led-efficiency-droop>>. Acesso em: Dezembro 2017.
- TAMIZHMANI, G. et al. Photovoltaic module thermal/wind performance: Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating. **NCPV and Solar Program Review Meeting**, Arizona, p. 936-939, 2003.
- TREBLE, F. C. **Generating Eletricity From the Sun**. 1<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Pergamon Press, v. II, 1991.
- VAQUERO, D. G. **Supply of solid-state lamps from the ac mains. modeling of LED lamps, study of the integrated buck-flyback converter, and proposal of a new optimised dimming scheme**. Tese (PHD) - University of Oviedo (Universidade de Oviedo). Espanha, p. 333. 2013.
- VERA, L. H. **Programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 187. 2004.
- VICTRON-ENERGY. Victor Energy - Blue Power. **Datasheet Lithium Ion and Lynx Ion**, 2017. Disponível em: <<https://www.victronenergy.pt/upload/documents/Datasheet-Lithium-ion-and-Lynx-Ion-EN.pdf>>. Acesso em: Junho 2017.
- YAU, H.-T.; LIANG, Q.-C.; HSIEH, C.-T. Maximum power tracking and optimal Li-ion battery charging control for photovoltaic charging system. **Computers and Mathematics with applications** 64, p. 822-832, 2012.
- ZAGONEL. Zagonel - Tecnologia Eficiente. **Luminárias Públicas 60W - ZL49**, 2017. Disponível em: <<http://www.zagonel.com.br/detalhe-produto/57/>>. Acesso em: Agosto 2017.

## ANEXO 1 – CÁLCULO DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE

Os cálculos da radiação extraterrestre são apresentados na forma de diagrama de blocos do item 6.2.1 desta dissertação. A tabela utilizada para realização destes cálculos pode ser encontrada em:

<https://1drv.ms/x/s!AIFN9L8fDm-diYkYjhjY3SzPQWNvfg>

O software utilizado nestes cálculos foi o LibreOffice Versão: 5.3.4.2.

Segue a tabela com as radiações extraterrestres encontrados para todo o período em que a mesma é superior a zero no mês Janeiro, como referência:

<b>Radiação ET no mês de Janeiro para Santa Maria/RS</b>														
<b>Dia/Hora</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>
1	90,48	386,06	674,01	934,72	1.150,42	1.306,41	1.392,06	1.401,54	1.334,19	1.194,61	992,30	741,07	458,02	162,45
2	87,27	383,00	671,26	932,40	1.148,62	1.305,20	1.391,46	1.401,52	1.334,69	1.195,54	993,53	742,45	459,40	163,67
3	84,00	379,90	668,47	930,05	1.146,80	1.303,97	1.390,83	1.401,47	1.335,15	1.196,42	994,70	743,76	460,70	164,79
4	80,66	376,74	665,64	927,67	1.144,96	1.302,71	1.390,17	1.401,38	1.335,58	1.197,25	995,81	745,00	461,90	165,81
5	77,26	373,54	662,78	925,26	1.143,09	1.301,43	1.389,49	1.401,27	1.335,97	1.198,02	996,85	746,15	463,01	166,72
6	73,80	370,29	659,88	922,82	1.141,20	1.300,13	1.388,79	1.401,13	1.336,31	1.198,75	997,82	747,22	464,02	167,53
7	70,28	367,00	656,94	920,36	1.139,28	1.298,81	1.388,06	1.400,95	1.336,61	1.199,42	998,73	748,21	464,94	168,22
8	66,71	363,66	653,98	917,87	1.137,35	1.297,46	1.387,30	1.400,75	1.336,87	1.200,04	999,56	749,12	465,76	168,81
9	63,09	360,29	650,98	915,35	1.135,39	1.296,10	1.386,52	1.400,50	1.337,09	1.200,59	1.000,33	749,94	466,48	169,28
10	59,41	356,87	647,95	912,81	1.133,41	1.294,71	1.385,71	1.400,23	1.337,25	1.201,09	1.001,02	750,67	467,10	169,64
11	55,69	353,42	644,90	910,25	1.131,41	1.293,30	1.384,88	1.399,91	1.337,38	1.201,53	1.001,64	751,31	467,62	169,89
12	51,92	349,93	641,81	907,67	1.129,39	1.291,86	1.384,01	1.399,56	1.337,45	1.201,91	1.002,17	751,86	468,03	170,02
13	48,11	346,41	638,71	905,07	1.127,36	1.290,41	1.383,12	1.399,17	1.337,47	1.202,22	1.002,64	752,32	468,34	170,03
14	44,25	342,86	635,58	902,45	1.125,30	1.288,93	1.382,20	1.398,74	1.337,44	1.202,46	1.003,02	752,69	468,54	169,93
15	40,36	339,28	632,42	899,81	1.123,22	1.287,43	1.381,25	1.398,27	1.337,36	1.202,64	1.003,32	752,96	468,63	169,71
16	36,42	335,67	629,25	897,15	1.121,13	1.285,91	1.380,26	1.397,77	1.337,22	1.202,75	1.003,53	753,13	468,61	169,36
17	32,45	332,03	626,05	894,48	1.119,02	1.284,36	1.379,25	1.397,21	1.337,03	1.202,80	1.003,66	753,20	468,48	168,90
18	28,45	328,37	622,84	891,79	1.116,89	1.282,79	1.378,21	1.396,62	1.336,78	1.202,76	1.003,71	753,17	468,24	168,31
19	24,41	324,69	619,61	889,08	1.114,74	1.281,20	1.377,13	1.395,98	1.336,47	1.202,66	1.003,66	753,04	467,88	167,60
20	20,35	320,98	616,37	886,36	1.112,57	1.279,59	1.376,02	1.395,29	1.336,10	1.202,48	1.003,53	752,81	467,40	166,77
21	16,25	317,26	613,10	883,63	1.110,39	1.277,95	1.374,87	1.394,56	1.335,67	1.202,22	1.003,30	752,47	466,82	165,81
22	12,13	313,52	609,83	880,88	1.108,20	1.276,28	1.373,69	1.393,78	1.335,18	1.201,89	1.002,98	752,02	466,11	164,73
23	7,99	309,76	606,54	878,12	1.105,98	1.274,60	1.372,48	1.392,95	1.334,63	1.201,48	1.002,57	751,47	465,28	163,51
24	-	305,98	603,24	875,35	1.103,75	1.272,88	1.371,23	1.392,07	1.334,01	1.200,98	1.002,06	750,81	464,34	162,18
25	-	302,20	599,94	872,56	1.101,50	1.271,14	1.369,94	1.391,14	1.333,32	1.200,40	1.001,45	750,03	463,27	160,71
26	-	298,40	596,62	869,77	1.099,24	1.269,38	1.368,61	1.390,16	1.332,56	1.199,74	1.000,75	749,15	462,08	159,12
27	-	294,59	593,29	866,96	1.096,95	1.267,59	1.367,24	1.389,12	1.331,73	1.198,99	999,94	748,15	460,77	157,40
28	-	290,77	589,96	864,15	1.094,66	1.265,77	1.365,83	1.388,03	1.330,83	1.198,16	999,04	747,04	459,34	155,55
29	-	286,95	586,62	861,32	1.092,34	1.263,93	1.364,39	1.386,88	1.329,86	1.197,23	998,02	745,81	457,78	153,57
30	-	283,12	583,28	858,49	1.090,01	1.262,05	1.362,90	1.385,67	1.328,82	1.196,22	996,91	744,47	456,10	151,46
31	-	279,29	579,93	855,65	1.087,66	1.260,15	1.361,36	1.384,40	1.327,70	1.195,12	995,69	743,01	454,30	149,22

## ANEXO 2 – CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO

Devido ao elevado número de informações processadas as tabelas de dimensionamento não puderam ser anexadas no trabalho. Entretanto, a fim de demonstrar o dimensionamento elaborado está disponibilizada uma planilha demonstrativa dos cálculos elaborados. No seguinte endereço:

<https://1drv.ms/x/s!AIFN9L8fDm-diYkLCBVUKVUISZS1NA>

Além desta, as planilhas originais utilizadas para realização dos cálculos estão disponibilizadas em:

<https://1drv.ms/f/s!AIFN9L8fDm-diYkNP-QxcudwfxTncg>