



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU)
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA (FEELT)

FERNANDO LUIZ DE CASTRO JUNIOR

**ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO À ILUMINAÇÃO
PÚBLICA EFICIENTE**

UBERLÂNDIA
2018

FERNANDO LUIZ DE CASTRO JUNIOR

**ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO À ILUMINAÇÃO
PÚBLICA EFICIENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, como item obrigatório parcial ao título de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador: Carlos Eduardo Tavares

UBERLÂNDIA
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço à oportunidade concedida a mim, de concluir mais uma etapa em minha vida e a conclusão da graduação.

Aos meus pais, Fernando e Luciana por todo o suporte, apoio e doação dado durante minha vida. Aos meus irmãos Luana, Lucas e Gabriel por sempre estarem ao meu lado. A minha namorada Fernanda por todo companheirismo, motivação e amor compartilhados durante essa jornada.

Aos meus amigos que compartilharam e vivenciaram todos esses momentos ao meu lado.

Ao Professor Carlos Eduardo (Cadu), professor e orientador a quem admiro e sou grato pela orientação e possibilidade da realização deste estudo.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo fazer uma proposição e análise de um sistema fotovoltaico integrado a um sistema de iluminação pública eficiente. Os sistemas fotovoltaicos são compostos por painéis solares capazes de converter a radiação proveniente do Sol em energia elétrica disponível. Esta energia pode ser utilizada pelo consumidor ou injetada na rede elétrica de baixa-tensão em um conceito de geração distribuída. Ao serem analisados os sistemas de Iluminação Pública, percebe-se que os mesmos em grande maioria se encontram defasados e utilizam luminárias que podem ser substituídas por novas tecnologias mais eficientes, além de serem um local disponível para a instalação dos painéis solares. Para a elaboração da análise do sistema proposto será feita uma introdução do panorama fotovoltaico e da iluminação pública, seguido da explanação dos conceitos dos mesmos. Por fim, será feita uma comparação dos resultados de iluminação obtidos pelas novas luminárias, com o auxílio do software DIALux, e a norma ABNT NBR 5101 – Iluminação Pública: Procedimentos. Em seguida é feita uma análise financeira e energética do sistema fotovoltaico integrado a iluminação pública para avaliar a viabilidade de implementação desta proposta.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Iluminação Pública, Eficiência Energética, DIALux, Geração Distribuída.

ABSTRACT

The present study aims to make a proposal and analysis of a photovoltaic system integrated to an efficient public lighting system. Photovoltaic systems are composed of solar panels capable of converting the radiation from the sun into available electrical energy. This energy can be used by the consumer or injected into low-voltage power grid on a distributed generation concept. When analyzing the systems of Public Lighting, it is noticed that they are mostly out of phase and use luminaires that can be replaced by new and more efficient technologies, besides being a place available for the installation of solar panels. For elaboration of the analysis of the proposed system will be made an introduction of the photovoltaic panorama and the public lighting, followed by the explanation of the concepts on same ones. Finally, a comparison of lighting results obtained by new luminaires will be made, with the help of DIALux software, and ABNT NBR 5101 - Public Lighting: Procedures. Furthermore, a financial and energy analysis of the photovoltaic system integrated to the public lighting is carried out to evaluate the feasibility of implementing this proposal.

Keywords: Photovoltaic Energy, Street Lighting, Energy Efficiency, DIALux, Distributed Generation.

LISTAS

Figura 1 - Tabela geração de energia elétrica brasileira (Aneel, 2018).	16
Figura 2 - Gráfico de potência na geração brasileira (Aneel, 2018).....	17
Figura 3 - Gráfico exclusão de energia elétrica (Aneel, 2018).....	20
Figura 4 - (A) E.M. Castelhanos Canto da Lagoa, Praia de Castelhanos. (B) E.M. Prof. João Antonio Cesar, Praia Mansa - Ilhabela SP	21
Figura 5 - Geração distribuída no Brasil (Aneel, 2018).....	23
Figura 6 - Espectro de ondas da radiação solar.....	25
Figura 7 - Radiação Direta e Difusa (IBICT, 2016).....	26
Figura 8 - Ângulação Zenital (Villalva, 2012).....	27
Figura 9 - Mapa Solarimétrico Brasil (Crecesb 2000).....	29
Figura 10 - Movimentos Translação e Rotação Planeta Terra (Mundo e Educação, 2014).	30
Figura 11 - Declinação Solar e Estações do Ano (Villalva, 2012).....	30
Figura 12 - Posição Solar Definida Pelos Ângulos Azimutal, Zenital e Altura Solar (Villalva, 2012).	32
Figura 13 - Ângulo de Incidência dos Raios Solares (Villalva, 2012).....	32
Figura 14 - Ângulo de inclinação dos módulos (Bosch, 2011).....	33
Figura 15 - Sistema Fotovoltaico "off-grid".	34
Figura 16 - Sistema fotovoltaico "on-grid".	36
Figura 17 - Módulo Fotovoltaico (Canadian, 2017).....	37
Figura 18 - Funcionamento Células Fotovoltaicas (Villalva, 2012).	38
Figura 19 - Curvas I-V Módulo Fotovoltaico Canadian (Canadian, 2017).....	39
Figura 20 - Controlador de Carga (Minha Casa Solar, 2017).	41
Figura 21 - Banco de Baterias (MPPT Solar, 2017).	41
Figura 22 - Influência na Vida-Útil de uma Bateria (Moura, 2015).....	42
Figura 23 - Inversor Fotovoltaico Fronius "Grid-Tie" (Portal Solar, 2018).	43
Figura 24 - Princípio de Funcionamento Inversor Fotovoltaico (Villalva, 2012).	43
Figura 25 - Medidor Bidirecional Fronius (Eco Brasil Solar, 2017).	45
Figura 26 - Sistema Fotovoltaico Integrado a Iluminação Pública.	49
Figura 27 - Módulo Fotovoltaico Canadian Solar CS6U 330 (Minha Casa Solar, 2018).	51
Figura 28 - Características Elétrica Painel (Fonte: Canadian Solar cs6u).	51
Figura 29 - Curvas IxV Painel Fotovoltaico (Canadian Solar).....	52
Figura 30 - - Microinversor Fotovoltaico APSsystems (Minha Casa Solar, 2018).....	53
Figura 31 - Características Elétricas Microinversor (Minha Casa Solar, 2018).....	53
Figura 32 - Acoplamento Microinversor no Módulo Fotovoltaico (Minha Casa Solar, 2018).	54
Figura 33 - Painel Led LEX01-S3M750. (Lumicenter, 2018).	55

Figura 34 - Volume de Tráfego nas Vias (ABNT, 2012. Adaptado).	58
Figura 35 - Classe de Iluminação das Vias (ABNT, 2012. Adaptado).	59
Figura 36 - Disposição da Luminária LED LEX01-S3M750. (DIALux, 2018).	60
Figura 37 - Distribuição Luminárias na Via. (DIALux, 2018).	60
Figura 38 - Projeto Luminárias DIALux. (DIALux, 2018).	61
Figura 39 - Projeto Isolinas Via M2.(DIALux, 2018).	61
Figura 40 - Malha de Iluminância Horizontal.(DIALux, 2018).	62
Figura 41 - Classe de Iluminação (ABNT, 2012 Adaptado).	62
Figura 42 - Comparativo Norma x Resultados.	63
Figura 43 - Tabela Preço dos Equipamentos do Sistema.	64
Figura 44 - Tarifa B1 Cemig (Cemig, 2018).	65
Figura 45 - Tarifa B4 Cemig (Cemig, 2018).	65
Figura 46 - Parâmetros do TRC.	66
Figura 47 - Gráfico Tempo Retorno Capitalizado.	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Iluminação Pública no Brasil	13
1.1.2 Matriz Energética Brasileira e Energia Solar Fotovoltaica	15
1.2 Justificativas	19
1.2.1 Iluminação Pública e Energia Elétrica em Locais Remotos	19
1.2.2 Geração Distribuída: Alternativa Para o Sistema Interligado Nacional (SIN)	21
2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO	24
2.1 Conceitos Básicos	24
2.1.1 Radiação Solar	24
2.1.2 Massa de Ar	26
2.1.3 Irradiância	28
2.1.4 Insolação	28
2.1.5 Movimentos do Planeta Terra	29
2.1.6 Orientação dos Módulos Fotovoltaicos	33
2.2 Sistemas Fotovoltaicos	33
2.2.1 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	34
2.2.2 Componentes de Sistemas Fotovoltaicos	37
2.3 Conceitos de Iluminação	45
3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA	48
3.1 Dimensionamento do Sistema de Iluminação Pública Fotovoltaica	48
3.1.1 O Sistema	48
3.1.2 Módulo Fotovoltaico	50
3.1.3 Inversor Fotovoltaico	52
3.1.4 Painel Led	54
3.2 Comparação dos Requisitos da NBR 5101	55
3.2.1 ABNT NBR 5101: Iluminação Pública - Procedimento	55

3.2.2 Distribuição das Luminárias	59
3.2.3 Projeto Luminária Led DIALux	61
3.2.4 Comparação dos Resultados com a Norma NBR 5101	62
3.3 Análise do Projeto	63
3.3.1 Análise Financeira.....	64
CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXOS.....	75

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o conceito de desenvolvimento sustentável tem se tornado mais evidente e necessário em âmbito mundial. Dentre suas vertentes, existe uma grande discussão sobre as formas de aproveitamento das fontes energéticas para a geração de energia elétrica, assim como também com o seu uso de forma mais econômica e racional. Especialmente no Brasil, a preocupação com o uso racional da energia elétrica foi estimulada após um período de seu racionamento experimentado por todos os brasileiros no ano de 2001. Com a eventual escassez de chuva e o baixo nível dos reservatórios de quase todas as usinas hidrelétricas brasileiras, consumir energia elétrica de forma mais racional é primordial, pois a possibilidade de uma nova medida de contenção de gastos com a energia elétrica seria proibitiva na atual política de desenvolvimento do país.

Apoiada nesses fatores e estimulada pela iniciativa do governo, através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), um grande exemplo do uso eficiente da energia está nas mais novas gerações de sistemas de iluminação que utilizam tecnologia LED. Um grande impacto desta tecnologia pode ser vista em sistemas de Iluminação Pública (IP). Utilizando lâmpadas em grande quantidade a iluminação pública se apresenta como solução para segurança, saúde e conforto dos usuários. Além de ser um item imprescindível para a infraestrutura de uma cidade e a vida cotidiana de seus cidadãos, em um país com problemas de segurança como é o caso do Brasil, a IP se torna questão social.

Sob o ponto de vista da geração de energia por meio de fontes não convencionais, o sistema fotovoltaico surge como alternativa na obtenção de energia elétrica, uma vez que o mesmo pode captar a energia na forma de radiação solar e transformá-la em energia elétrica para alimentar os equipamentos elétricos.

Face ao exposto, vislumbrou-se neste trabalho a possibilidade de combinar um projeto de iluminação pública eficiente em conjunto com um sistema fotovoltaico, atuando concomitantemente nas duas vertentes apresentadas. Portanto, é feita uma proposição de um sistema de iluminação pública eficiente utilizando de luminárias LED (*light emitting diode*) em conjunto com um sistema fotovoltaico.

Desta forma, além de atender as necessidades de segurança pública ou da infraestrutura de uma cidade, este projeto propõe uma estratégia de utilização da energia de forma mais eficiente e de contribuição para a matriz energética nacional com menores impactos ambientais, uma vez que a energia obtida a partir de painéis fotovoltaicos é classificada como uma fonte de energia limpa.

Para tanto, inicialmente, é apresentado o panorama atual da iluminação pública e da matriz energética brasileira. Na sequência, é mostrado como o sistema proposto pode se apresentar como uma solução interessante tanto em sua concepção isolada (*off grid*) como na topologia conectada à rede de distribuição de energia elétrica (*on grid*). Posteriormente, explicações sobre luminotécnica e sobre os sistemas fotovoltaicos, envolvendo o princípio de funcionamento e os conceitos que norteiam o seu dimensionamento, são abordados. Finalmente é realizado um caso de estudo para exemplificar a aplicação da proposta aqui feita, onde são detalhados o dimensionamento do sistema, a simulação computacional do mesmo, os resultados esperados para os níveis de iluminância, e uma análise econômica do tempo de retorno do capital investido vislumbrando a viabilidade de execução do projeto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Iluminação Pública no Brasil

No Brasil existem 5.760 municípios distribuídos de formas bastante diversas quando considerados indicadores socioeconômicos e demográficos (Eletrobrás, 2012). O grande desafio se baseia em desenvolver métodos diferentes para melhoria da eficiência energética na IP, atendendo diferentes necessidades dos mesmos.

No que diz respeito à IP, a responsabilidade pela prestação do serviço é da prefeitura a qual o sistema faz parte, condição estabelecida no art. 30, inciso V da Constituição Federal. Amparada pela Resolução Normativa nº 414, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de 9 de setembro de 2010.

“Art. 21. A elaboração de projeto, a implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública são de responsabilidade do ente municipal ou de quem tenha recebido deste a delegação para prestar tais serviços.” (ANEEL, 2010).

Portanto a responsabilidade de prover a entrega de claridade em locais de maneira periódica, contínua ou eventual é da pessoa jurídica de direito. O que pode acontecer é a prefeitura contratar os serviços das distribuidoras de energia elétrica para realizarem a instalação e manutenção dos equipamentos.

A iluminação pública se apresenta como item obrigatório de infraestrutura das cidades, ela é responsável por atuar em áreas como a qualidade de vida, cidadania e segurança. Preocupado com a melhoria e eficiência da iluminação pública brasileira, O Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficiente conhecido como PROCEL RELUZ, é o programa criado pela Eletrobrás, com o apoio do Ministério de Minas e Energia (MME) no ano de 2000. Implementado pelas concessionárias de energia elétrica juntamente com as prefeituras e governos estaduais. O programa atua com o objetivo de buscar soluções com eficiência energética na iluminação pública, e que possam prover mais segurança e habitação para espaços públicos urbanos. O programa atua nas seguintes áreas:

- Melhoria dos Sistemas de Iluminação Pública Existentes;
- Expansão dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Remodelagem dos Sistemas de Iluminação Pública;
- Melhoria dos Sistemas de Sinalização Semafórica;
- Iluminação Especial (Destaque de praças, monumentos, fachadas, etc);
- Iluminação de Espaços Públicos Esportivos;
- Inovação Tecnológica na Iluminação Pública (PROCEL, 2000).

O PROCEL RELUZ atua na busca por soluções mais eficientes na iluminação pública. Portanto promove a substituição de lâmpadas, luminárias e sistemas por outros mais novos e eficientes. Segundo o PROCEL é possível atingir uma economia de energia elétrica de cerca de 30% na substituição de sistemas de iluminação pública e 90% na iluminação semafórica, por sistemas mais eficientes como o LED.

Pode-se destacar também como benefícios da substituição por tecnologias mais eficientes o melhor conforto para os cidadãos ao dirigirem, maior segurança aos pedestres e habitação de locais. A partir do programa desde a sua criação em 2000, foram substituídos equipamentos em mais de 2,78 milhões de sistemas de iluminação pública, em 1.300 cidades, somando os investimentos em torno de R\$ 500 milhões (PROCEL, 2000).

Segundo a Lei nº 13.280, de 3 de maio de 2016, as concessionárias de energia elétrica obrigatoriamente devem investir em eficiência energética. Por meio do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), 0,1% da receita operacional líquida das distribuidoras de energia elétrica devem ser destinadas a empreendimentos que visam melhorias na eficiência energética brasileira (Eletrobrás, 2017).

Ao se analisar o cenário da IP das cidades brasileiras constata-se que a grande maioria ainda apresenta padrões ultrapassados em relação a eficiência energética dos sistemas. Encontra-se na grande maioria das vezes lâmpadas de vapor de sódio ou vapor de mercúrio, que quando comparadas com a tecnologia de LED para iluminação, apresentam um consumo de energia elétrica maior, uma vida útil menor e o seu descarte, se feito de maneira incorreta, pode acarretar problemas ambientais. As lâmpadas que possuem metais pesados em sua composição, como o mercúrio (Hg), a maioria utilizada na IP brasileira, devem ser manuseadas de forma a impedir que o metal contido entre em contato com o meio ambiente. O descarte indevido pode causar problemas de saúde humana e danos ambientais (Procel e Eletrobrás, 2004).

1.1.2 Matriz Energética Brasileira e Energia Solar Fotovoltaica

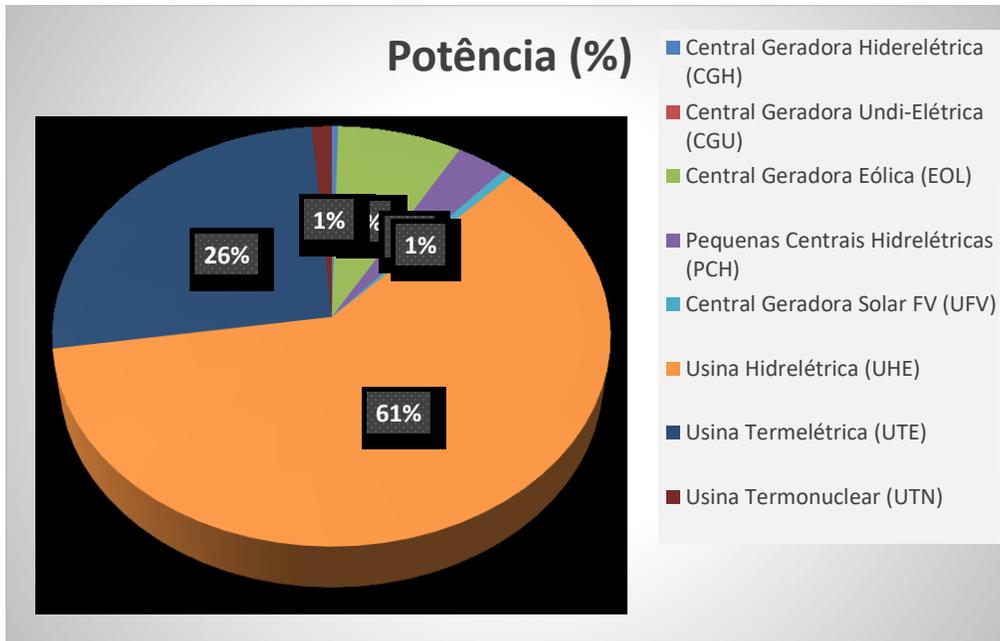
Segundo o Banco de Informações de Geração – BIG, banco de dados com todas as informações sobre a geração de energia elétrica no Brasil fornecido pela ANEEL, existem cerca de 4.912 empreendimentos em ação totalizando 158.146.917 kW de potência instalada. De acordo com a Figura 1, dados acessados no BIG em 09 de março de 2018, observa-se que o tipo utilizado para geração de energia elétrica em 60,46% do sistema elétrico brasileiro são as usinas hidrelétricas, seguido por termelétricas que são responsáveis por 26,14% da geração (ANEEL, 2018). Pela análise da Figura 2 constata-se uma grande parcela de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia, colocando o país na frente da maioria dos outros que utilizam combustíveis fósseis como a principal matriz energética.

A fonte, a qual o sistema elétrico brasileiro se baseia, é considerada uma fonte limpa de energia, pois não envolve a liberação de gases e do efeito estufa como o CO_2 para o meio ambiente, diferentemente da energia elétrica gerada a partir de uma fonte térmica. No entanto, quando se observa que as fontes limpas de energia representadas pela biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, eólica e fotovoltaica, ainda representam um valor pequeno, principalmente no tocante a esta última quando verificado o potencial do Brasil para a geração de energia elétrica a partir de tais fontes renováveis.

Figura 1 - Tabela geração de energia elétrica brasileira (Aneel, 2018).

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
Central Geradora Hiderelétrica (CGH)	668	621.735	623.971	0,39
Central Geradora Undi-Elétrica (CGU)	1	50	50	0
Central Geradora Eólica (EOL)	510	12.532.539	12.509.743	7,91
Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)	429	5.070.129	5.040.123	3,19
Central Geradora Solar FV (UFV)	85	1.025.962	1.021.602	0,65
Usina Hidrelétrica (UHE)	218	101.883.450	95.619.468	60,46
Usina Termelétrica (UTE)	2.999	42.715.819	41.341.960	26,14
Usina Termonuclear (UTN)	2	1.990.000	1.990.000	1,26
TOTAL	4912	165.839.684	158.146.917	100

Figura 2 - Gráfico de potência na geração brasileira (Aneel, 2018).



O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2026 surge como uma alternativa para orientar as ações e decisões a serem tomadas acerca da expansão do sistema elétrico brasileiro. Isto deve no sentido de garantir que os investimentos sejam feitos em sintonia conforme o crescimento econômico em bases técnicas da demanda, se mantendo ambientalmente sustentável. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), diante da elaboração do PDE 2026, o consumo de energia elétrica deverá crescer à média de 1,9% anual de 2016 a 2026. Tal crescimento significa grandes investimentos na geração e transmissão de energia elétrica. Os investimentos globais chegam a ordem de R\$ 1,4 trilhão, sendo que o objetivo é que a matriz energética renovável não convencional chegue a 48% e que a energia elétrica oriunda de fontes renováveis, considerando hidrelétrica e PCHs, chegue a 87%. Destacam-se no plano a expansão de 11,8 GW de energia eólica e de 7GW para energia solar fotovoltaica (MME e EPE, 2017).

Os tipos mais comuns de aproveitamento de energia solar são os painéis fotovoltaicos (FV), que convertem a radiação solar em energia elétrica e será abordado posteriormente nesse trabalho com mais detalhes, assim como o aproveitamento da luz solar através de concentradores solares plano (CSP), que utiliza o calor de maneira direta ou geração de energia elétrica por meio dos concentradores.

O potencial brasileiro para gerar energia proveniente do Sol é enorme, o país conta com altos índices de irradiação solar, principalmente no Nordeste. Porém, quando se analisa a geração no Brasil, o país conta com apenas 438,3MW de potência instalada em 15,7 mil instalações. Um número baixo quando comparados com países europeus, principalmente com a irradiação solar disponível no Brasil sendo muito maior. A Grécia, por exemplo, conta com 2.611MW de potência instalada distribuídos em um território menor com uma quantidade de irradiação disponível também menor (MME, 2016).

As aplicações fotovoltaicas de geração distribuída no Brasil não possuíam o respaldo necessário até a criação da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, de 17 de abril de 2012. Nesta, foram estabelecidas as normas e regimentos regulatórios sobre o acesso à rede de distribuição de microgeração e minigeração distribuída a partir da fonte fotovoltaica. Também ficou definido o sistema de compensação de geração de energia elétrica (net metering) e as adequações necessárias nos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.

O sistema de compensação de energia net metering, se baseia no conceito de uma “conta-corrente” de energia existente entre o consumidor que está injetando energia na rede de distribuição e a concessionária. É calculada a diferença entre geração e o consumo de energia elétrica. Caso haja uma diferença positiva é gerado um “crédito” em energia elétrica a ser utilizado nos próximos 36 meses.

Em relação as alterações estabelecidas ao PRODIST a partir de Resolução nº 482, as principais fazem referência ao módulo 3. São itens contemplados nas alterações: etapas de viabilização do acesso, critérios técnicos e operacionais, requisitos dos projetos, implantação de novas conexões, requisitos para operação, manutenção e segurança da conexão, sistemas de medição e contratos.

Como forma de incentivo aos consumidores para que eles se insiram na geração distribuída, uma forma que necessita ser levada em consideração é a concessão de financiamentos especiais para a construção desses empreendimentos. Em resposta a isso o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), admitiu que os empreendimentos residenciais seriam financiados em até 80% pelo programa PROESCO de apoio a projetos de eficiência energética, com taxa de juros de cerca de 4% a.a. em termos reais.

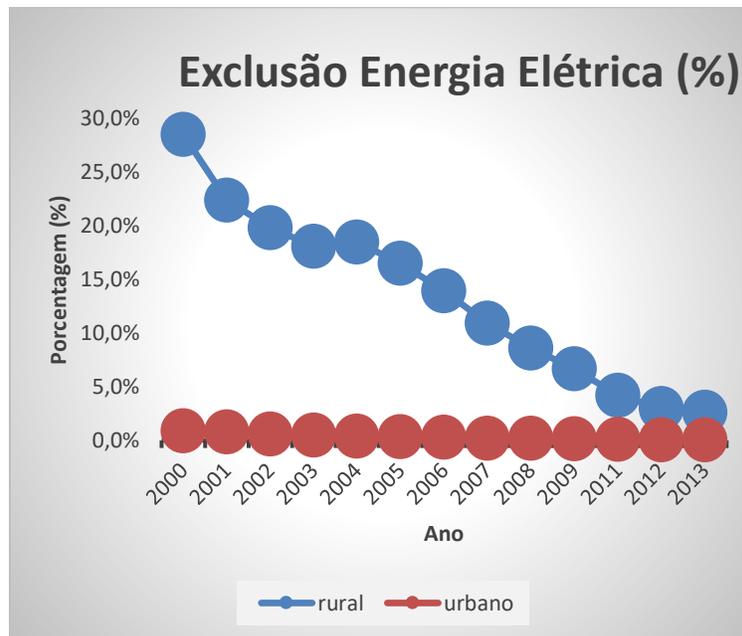
1.2 Justificativas

1.2.1 Iluminação Pública e Energia Elétrica em Locais Remotos

Iluminação pública e energia elétrica disponível para utilização se apresentam como demandas sociais. Em um país marcado por suas discrepâncias sociais como o Brasil tais demandas também sofrem como as outras, principalmente quando se trata de locais afastados dos grandes centros econômicos ou de difícil acesso. Uma alternativa para que todos tenham acesso à energia elétrica são os sistemas fotovoltaicos, que podem operar de maneira interligada ao restante sistema elétrico ou de forma isolada. Esse segundo modo de operação pode ser utilizado para gerar energia elétrica à população que vive em locais isolados ou de difícil acesso, os quais o Sistema Interligado Nacional - SIN não abrange.

A energia solar fotovoltaica proveniente da radiação solar, transformada em energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos pode ser utilizada em sincronismo com a energia gerada por usinas disponível na rede de distribuição, ou pode ser armazenada em bancos de baterias para serem utilizadas em um momento diferente da geração, normalmente armazenada para usufruto em períodos noturnos. Elementos como energia elétrica, são essenciais para que a população possa se desenvolver na educação, garantir saúde, habitação e segurança. Porém é usual que a demanda e oferta de energia elétrica acompanha o crescimento econômico da região. Com o advento da imigração rural brasileira para os grandes centros urbanos, os investimentos em oferta de energia elétrica se concentraram nessas regiões. A partir de políticas públicas adotadas pelo MME pode-se observar, conforme a Figura 3, que a diferença existente entre a oferta de energia elétrica nas áreas urbana e rural vem diminuindo com o passar dos anos.

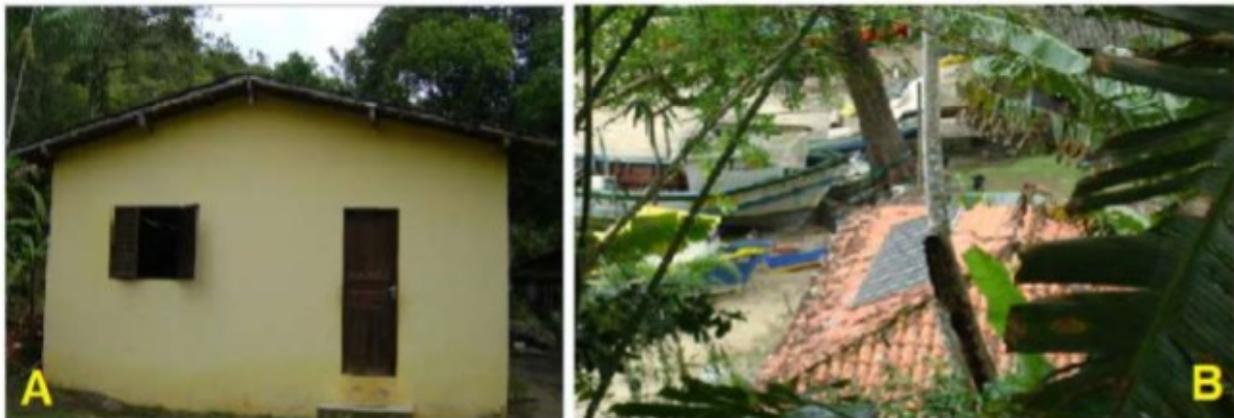
Figura 3 - Gráfico exclusão de energia elétrica (Aneel, 2018).



A área de abrangência do fornecimento de energia elétrica em áreas urbanas e principalmente em áreas rurais está passando por um processo de melhoria no atendimento, isto é fruto do desenvolvimento de programas de eletrificação, como o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), o Programa Nacional de Eletrificação Rural “Luz no Campo”, o Projeto de Centros Comunitários de Produção (CCP) e o Programa de Universalização de Energia Elétrica “Luz Para Todos”. Os principais beneficiários dessas ações são populações que vivem em locais de difícil acesso, como por exemplo, comunidades remotas no estado do Amapá que se localizam em meio a Floresta Amazônica e utilizam de sistemas isolados para acesso à energia elétrica (IBGE, 2015).

O fato de não possuir o acesso à energia elétrica pode gerar e agravar a desigualdade social entre regiões, pois a exclusão ao acesso à energia elétrica também restringe o acesso a outros serviços que garantem o desenvolvimento e a qualidade de vida, como por exemplo o acesso à educação. Amparados pelos programas que foram citados e que visam levar energia elétrica para o maior número de cidadãos, sistemas fotovoltaicos e grupo de geradores à diesel estão sendo instalados para promoverem o avanço da população que vive em tais regiões. Como exemplo pode-se citar as escolas rurais situadas em Ilhabela, ilustrado pela Figura 4, arquipélago no litoral norte de São Paulo, que utilizam energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, para garantir o acesso à educação as crianças da região (FONSECA, 2016).

Figura 4 - (A) E.M. Castelhanos Canto da Lagoa, Praia de Castelhanos. (B) E.M. Prof. João Antonio Cesar, Praia Mansa - Ilhabela SP



1.2.2 Geração Distribuída: Alternativa Para o Sistema Interligado Nacional (SIN)

A realização do PDE 2026, que rege como serão destinados os investimentos em geração de energia elétrica nos próximos 10 anos, permite observar que os gastos em melhoria do sistema elétrico são sempre muito elevados, na ordem de 1,4 trilhões de reais conforme havia sido citado anteriormente.

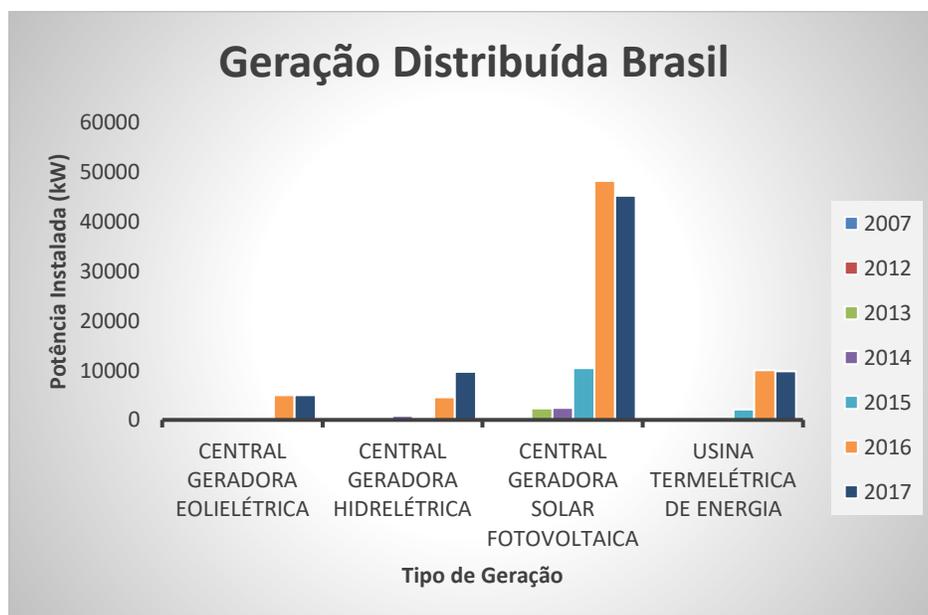
Diante dessa situação, as soluções que priorizam a utilização e geração da energia elétrica de maneira mais eficiente, de modo que os investimentos no SIN possam ser minimizados ou utilizados de forma mais otimizada, são de extrema relevância de serem estudadas, pois representam grande impacto na economia de uma maneira geral. Principalmente quando ao se tratar de tecnologias que tendem a ter um custo de produção mais baixo e uma maior eficiência, como o que acontece com a energia fotovoltaica.

Com o advento das fontes renováveis de energia, como as oriundas de fontes eólica e fotovoltaica, surge a possibilidade da geração de energia não mais concentrada em grandes usinas hidrelétricas, como é feito na maioria do território brasileiro, mas de maneira distribuída, com a geração de energia elétrica próximas às unidades consumidoras. Assim podem ser conectadas à rede de distribuição, possibilitando inclusive a interação com o SIN na forma de compra ou venda de energia. A Figura 5 indica que a geração distribuída vem crescendo de uma maneira muito acelerada nos últimos anos, principalmente nos anos de 2016 e 2017. A fonte de GD que mais vem crescendo nesses anos é a fotovoltaica.

A partir de então surge o conceito de Geração Distribuída (GD) que com a Resolução Normativa ANEEL nº482/2012, permite ao próprio consumidor a geração ou cogeração de energia elétrica qualificada com base em fontes renováveis, e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição.

Considerando os investimentos massivos para melhorias na infraestrutura e na geração de energia elétrica, os sistemas fotovoltaicos se apresentam como uma solução muito interessante, pois podem ser utilizados em locais remotos, possibilitando a esses locais infraestrutura e demandas sociais básicas como citado no item 1.2.1, assim como também podem ser utilizados de forma interligado ao restante do SIN, injetando a energia elétrica obtida pelos módulos fotovoltaicos na rede de distribuição.

Figura 5 - Geração distribuída no Brasil (Aneel, 2018).



De forma interligada os sistemas fotovoltaicos podem implicar em menores investimentos em obras para a construção de usinas de grande porte, além de não precisar ser gerada de forma concentrada, o que demandaria investimentos em linhas de transmissão.

Neste contexto, o presente trabalho mostra uma análise de como um sistema de iluminação pública eficiente em conjunto com um sistema fotovoltaico, conectado à rede elétrica, dentro do conceito de geração distribuída, pode impactar economicamente de forma positiva no atual panorama energético brasileiro.

2. Sistemas Fotovoltaicos e Conceitos de Iluminação

2.1 Conceitos Básicos

Durante este capítulo serão apresentados conceitos de extrema relevância para entendimento do estudo proposto. Conceitos básicos de sistemas fotovoltaicos e luminotécnica, que servem para nortear a análise a ser feita em um sistema fotovoltaico integrado à iluminação pública. O referencial teórico utilizado para a conceituação de sistemas fotovoltaicos se baseia na leitura de Villalva (2012). Enquanto os conceitos de luminotécnica utilizam-se como referencial o livro de Délio (2009).

2.1.1 Radiação Solar

A energia proveniente do Sol chega até o planeta Terra por meio de radiação eletromagnética. A radiação é composta por ondas eletromagnéticas que possuem frequências e comprimentos de onda diferentes.

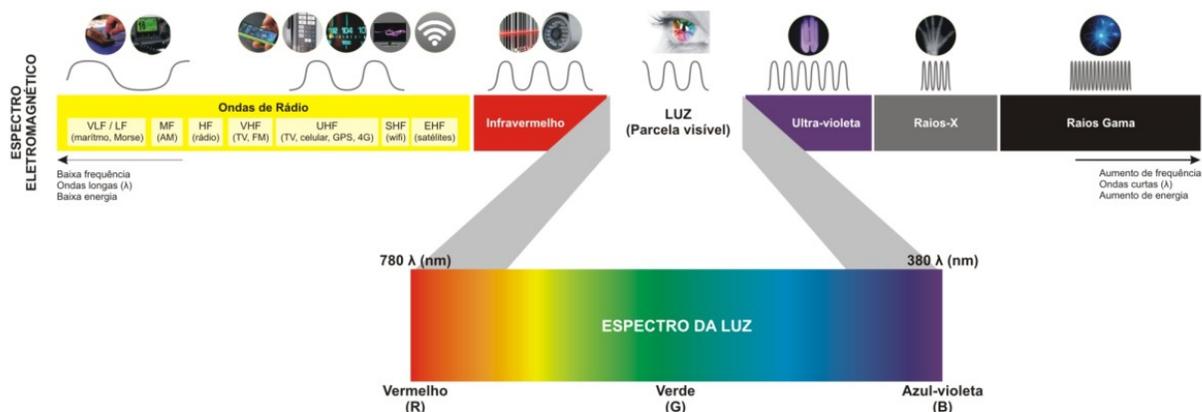
A energia que uma onda pode transmitir é diretamente proporcional a sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda. Conhecida como relação de Plank ou equação de Plank-Einstein, define uma proporcionalidade entre a energia de uma onda eletromagnética E , expressa em joules [J], e a sua frequência f , expressa em Hertz [Hz], pela Equação 1:

$$E = h * f \quad (1)$$

A constante física de proporcionalidade h , conhecida como constante de Plank, completa a equação. A mesma possui o valor de aproximadamente $6,636.10^{-34}$ [J.s].

As ondas eletromagnéticas provenientes do Sol podem ter efeitos diferentes quando em contato com objetos e seres vivos. Chama-se de espectro todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol, desse espectro somente uma pequena parcela é percebida pelo olho humano, conforme Figura 6, mas todas as frequências de onda transportam energia.

Figura 6 - Espectro de ondas da radiação solar.

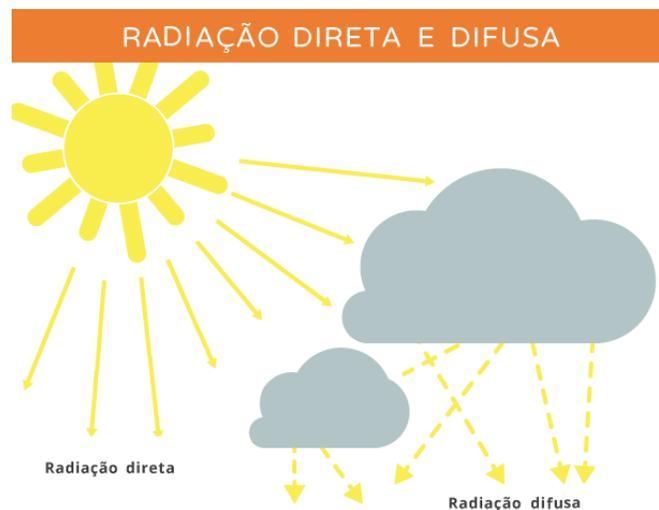


No espaço terrestre, antes de atingir a atmosfera, a radiação solar é composta aproximadamente de 53% de radiação invisível – com uma pequena parcela de luz infravermelha e uma grande parcela de luz ultravioleta – e 47% de luz visível. A luz visível, que pode ser captada pelo olho humano, é a parte do espectro que podemos enxergar e é a mesma utilizada pelas plantas para a realização da fotossíntese (Villalva, 2012, p. 40).

Os materiais possuem comportamentos diferentes ao serem submetidos a radiação solar. As ondas eletromagnéticas podem ser captadas e transformadas em calor, dessa forma a energia eletromagnética transmitida pelo Sol é transformada em energia térmica, que pode também ser considerada energia cinética pois refere-se ao grau de agitação das partículas e moléculas do corpo. Existem materiais que ao receberem radiação solar são capazes de produzir alterações elétricas, dentre os quais os principais efeitos são o fotovoltaico e fotoelétrico. No efeito fotovoltaico o material recebe as ondas eletromagnéticas e é capaz de transformar em energia elétrica através de uma diferença de potencial. Enquanto o efeito fotoelétrico o material é capaz de remover os seus elétrons ao entrar em contato com as ondas eletromagnéticas, esse efeito é muito confundido com o efeito fotovoltaico, porém não é capaz de gerar uma tensão elétrica. Para fins de análise, este estudo está focado no efeito fotovoltaico.

A radiação solar ao atravessar a atmosfera terrestre até chegar ao solo ou módulos fotovoltaicos sofre influência das diversas partículas de ar, poeira e obstáculos que ela encontra pelo seu caminho. A radiação global compreende a soma da radiação difusa e da radiação direta. A radiação difusa corresponde as ondas eletromagnéticas que chegam indiretamente ao plano, resultado da difração na atmosfera e reflexão nas partículas de ar e poeira. A radiação direta são as ondas que chegam em linha reta no plano em direção ao Sol conforme ilustra a Figura 7. Existem equipamentos que são capazes de medir a radiação solar, os mesmos são chamados de pirômetros.

Figura 7 - Radiação Direta e Difusa (IBICT, 2016).



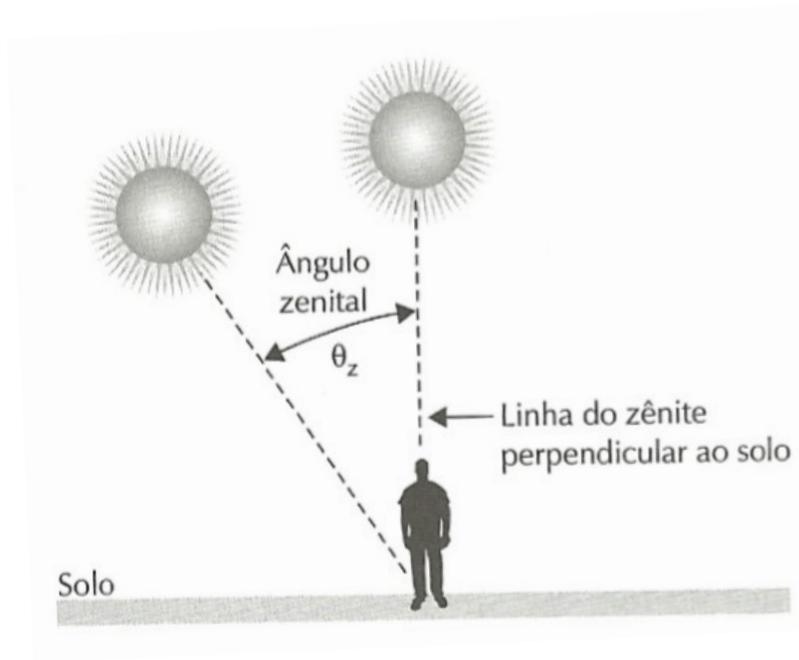
2.1.2 Massa de Ar

Como pode ser visto a radiação solar sofre influência conforme as características e composição da camada de ar que ela atravessa na atmosfera terrestre até chegar ao solo. A espessura dessa camada é conhecida como massa de ar (AM) ela é quantificada e depende do ângulo zenital (θ_z), dada pela Equação 2:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

O zênite corresponde a uma linha imaginária perpendicular ao solo. O ângulo zenital é zero quando o Sol se localiza exatamente sob a cabeça do observador conforme a Figura 8. A espessura da camada de ar que a radiação atravessa depende do comprimento do seu trajeto até chegar ao solo, que está relacionado com o ângulo zenital conforme pode-se observar, quanto maior for o ângulo zenital maior será o comprimento da massa de ar.

Figura 8 - Ângulação Zenital (Villalva, 2012).



A distribuição energética no espectro radiação solar depende da localização geográfica, dia e data, condições climáticas, composição da camada de ar além de outros fatores. O perfil médio característico da radiação solar em um local é função da massa de ar e pode ser obtido por meio de ensaios. A distribuição espectral AM1,5 que corresponde a um ângulo zenital igual à $48,5^\circ$, é utilizada como padrão em diversos livros e catálogos de fabricantes. A distribuição média é típica de países temperados do hemisfério norte, os quais são os principais responsáveis pelo surgimento e desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos, principalmente a Europa e os Estados Unidos (Villalva, 2012, p.43).

2.1.3 Irradiância

A grandeza utilizada para quantificar a radiação solar é a irradiância, medida expressa em W/m^2 (watts por metro quadrado), uma unidade de potência dividida por uma unidade de área. O dispositivo responsável por medir a radiação solar, pirômetro, citado no item anterior exibe suas medidas nesta unidade de grandeza. As unidades de potência expressam a quantidade de energia transportada em uma unidade de tempo, portanto, quanto maior for a irradiância maior será a energia transportada pela radiação solar. A grandeza irradiância representa uma densidade de potência por área (Villalva, 2012, p.45).

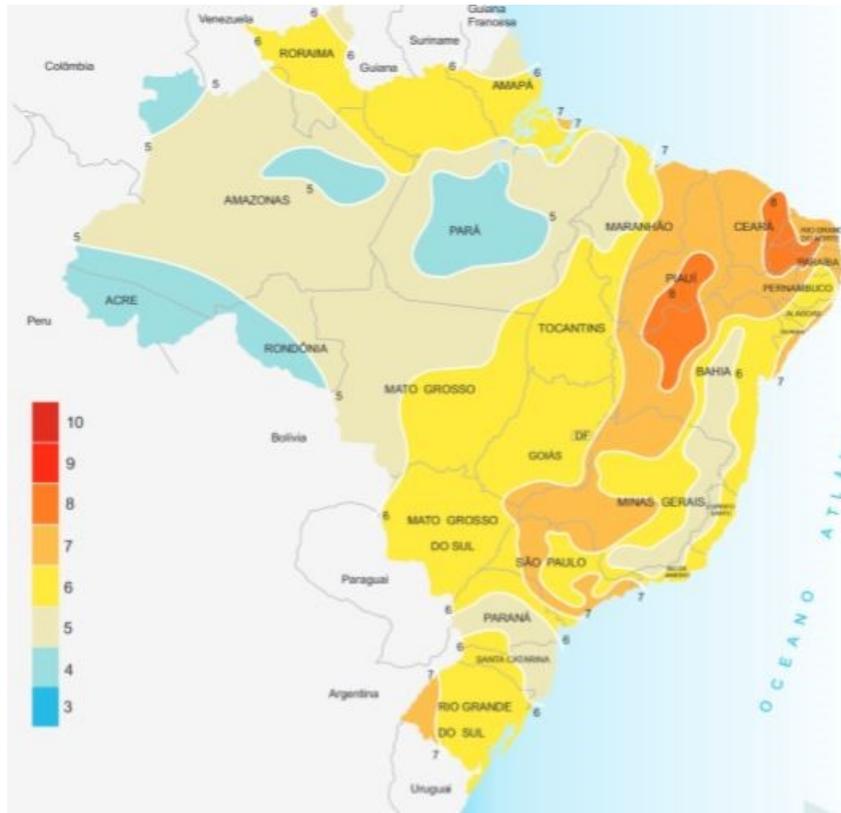
A irradiância na superfície terrestre é tipicamente $1000 W/m^2$ e esse valor é utilizado como padrão para análises e especificação, assim como a massa de ar AM1,5. Ambos juntos permitem colocar as células e módulos fotovoltaicos nos mesmos padrões para testes e dessa forma medir a eficiência dos mesmos comparadas a uma base padrão de condição da radiação solar.

2.1.4 Insolação

A insolação é a grandeza utilizada para quantificar a energia incidente em uma unidade de área, expressa em Wh/m^2 (watt-hora por metro quadrado). A unidade de energia expressa em Wh (watt-hora) dividida por uma unidade de área m^2 (metro quadrado) compõe a densidade de energia por área.

A medida da insolação é empregada diretamente no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, para tanto, a estimativa da mesma se faz extremamente necessária, diversos estudos e projetos são direcionados para medirem os níveis de insolação em locais diferentes do globo terrestre em intervalos de tempo cada vez menores, para uma melhor precisão. Os dados obtidos por sensores espalhados ao longo do Planeta são geralmente expressos em $Wh/m^2/dia$ (watt-hora por metro quadrado por dia) para efeitos de projeto (Villalva, 2012, p.47). Esses dados podem ser obtidos através de atlas solarimétrico ou de banco de dados que forneçam os níveis de insolação. Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico proposto nesse trabalho será utilizado o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II (Cemig, 2016), mostrado na Figura 9.

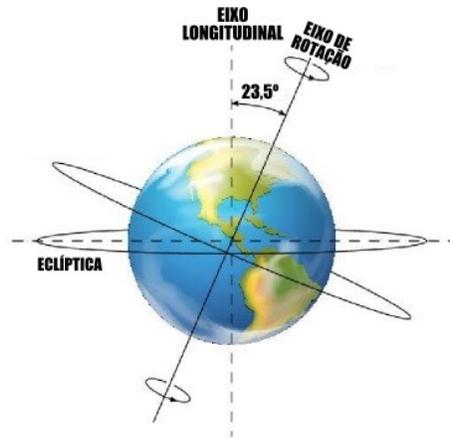
Figura 9 - Mapa Solarimétrico Brasil (Crecesb 2000).



2.1.5 Movimentos do Planeta Terra

O Planeta Terra se encontra em constante movimento em uma trajetória elíptica ao redor do Sol, o chamado movimento de translação, uma volta completa ao redor do Sol demoram 365 dias e 6 horas o que no nosso calendário corresponde a um ano. Ao mesmo tempo em que orbita ao redor do Sol a Terra faz um movimento de rotação em relação ao seu próprio eixo, que dura cerca de 24 horas o que no nosso calendário corresponde a um dia. O eixo de rotação da Terra é inclinado num ângulo de aproximadamente $23,5^\circ$ em relação ao eixo de translação como mostra a Figura 10, a inclinação dos eixos faz com que a distância dos hemisférios norte e sul sejam diferentes a cada dia do ano, em relação ao Sol, dando origem às estações do ano (Villalva, 2012, p.53).

Figura 10 - Movimentos Translação e Rotação Planeta Terra (Mundo e Educação, 2014).



O ângulo em que os raios solares incidem em relação a Linha do Equador é conhecido como declinação solar (δ), o mesmo varia durante o ano de acordo com a posição da Terra no movimento de translação assim como exposto na Figura 11. Nas proximidades da Linha do Equador não se observa o efeito com clareza, porém quando se afasta em direção aos polos norte e sul, passa-se a observar que essa angulação faz com que no verão os dias sejam mais longos e no inverno os dias sejam mais curtos. Ocasionalmente no início do verão o maior dia e no início do inverno o menor o dia, o que é conhecido como solstícios e verão e inverno respectivamente. No início do outono e da primavera tem-se os dias em que a radiação solar incide diretamente sobre a Linha do Equador, o que é conhecido como equinócio (Villalva, 2012, p.54).

Figura 11 - Declinação Solar e Estações do Ano (Villalva, 2012).



Conforme visto a declinação solar faz com que o Sol descreva uma trajetória diferente a cada dia do ano, isto reflete no ponto em que o Sol nasce e se põe no globo terrestre, logo também na trajetória descrita pelo mesmo durante um dia.

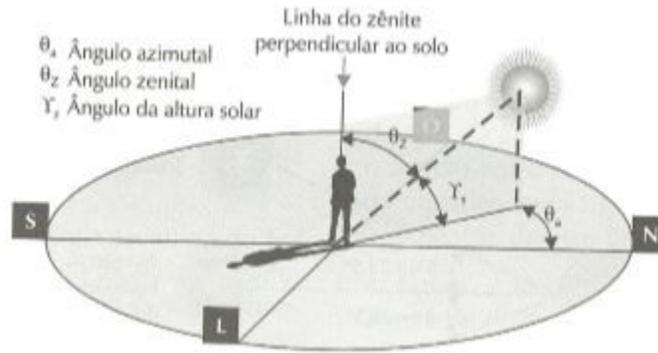
Um observador olhando fixo para o norte descreve o movimento do Sol ao longo do dia como sendo circular em relação à Terra, o ângulo que descreve a inclinação da trajetória do Sol com o plano horizontal é chamado de altura solar (γ_s).

A altura solar no céu é maior nos dias de verão, o que significa que nessa época do ano os raios incidem mais próximos à cabeça do observador, logo com um ângulo zenital menor percorrendo uma menor massa de ar. Durante os dias de inverno se observa o contrário: a altura solar é menor, logo o ângulo zenital é maior e a massa de ar percorrida também será maior (Villalva, 2012, p.56).

2.1.6 Orientação dos Módulos Fotovoltaicos

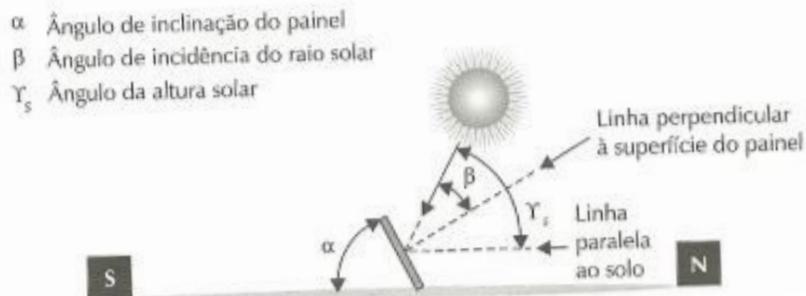
A orientação dos raios solares em relação ao norte geográfico possui uma angulação chamada ângulo azimutal (θ_a). Um observador localizado no hemisfério Sul e tendo como referência um ponto fixo voltado para o norte, notará que pela manhã o ângulo azimutal irá variar pela sua direita, enquanto durante a tarde a sua variação ocorrerá à esquerda do observador. Quando o ângulo azimutal é nulo tem-se o chamado de meio-dia solar e o Sol localiza-se exatamente à frente do observador e está na metade do seu percurso, o meio-dia solar não necessariamente coincide com o meio-dia horário. A posição do Sol em um determinado momento do dia depende do seu ângulo azimutal, ângulo zenital e da altura solar, conforme observado na Figura 12. Considerando o movimento do Sol desde o período em que nasce até o momento em que se põe, observando as variações do ângulo azimutal, é visto que a melhor maneira de se instalar os módulos fotovoltaicos é com a face voltada para o norte geográfico, caso o mesmo não possua um sistema de rastreamento automático do Sol, pois dessa maneira ele aproveitará da melhor maneira a radiação solar disponível durante o dia.

Figura 12 - Posição Solar Definida Pelos Ângulos Azimutal, Zenital e Altura Solar (Villalva, 2012).



A maneira a qual os raios solares incidem nos módulos fotovoltaicos dependem da posição do Sol naquele instante de tempo, e como já foi visto essa posição é definida pelos ângulos anteriormente citados. A Figura 13 mostra como os raios solares incidem em um módulo fotovoltaico, o ângulo de inclinação do painel (α) em relação ao solo deve ser dimensionado de maneira a minimizar e de uma maneira ideal até anular o ângulo de incidência dos raios solares (β). O ângulo de incidência do raio solar depende da altura solar em referência a uma reta perpendicular imaginária na face do módulo fotovoltaico, a altura solar varia diariamente, portanto para um aproveitamento máximo dos raios solares ocorreria com $\beta = 0$ e definido diariamente para cada altura solar (Villalva, 2012, p.57).

Figura 13 - Ângulo de Incidência dos Raios Solares (Villalva, 2012).



Para definir-se o ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos (α) não se há um consenso mundial. Como a grande maioria dos sistemas possuem a instalação fixa, a escolha do ângulo (α) deve seguir algum critério de maneira a maximizar a captação da radiação solar, para fins de dimensionamento nesse estudo será utilizado o critério definido pela fabricante Bosch, encontrado no manual do fabricante de seus módulos fotovoltaicos, conforme Figura 14.

Figura 14 - Ângulo de inclinação dos módulos (Bosch, 2011).

Latitude Geográfica do Local	Ângulo de Inclinação Recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos (SF) são responsáveis por transformar a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica. Por meio dos módulos fotovoltaicos e devido ao efeito fotovoltaico, estes são capazes de captar a radiação solar e a transformar em energia elétrica fornecendo uma tensão (V) e corrente (I) na saída de seus terminais.

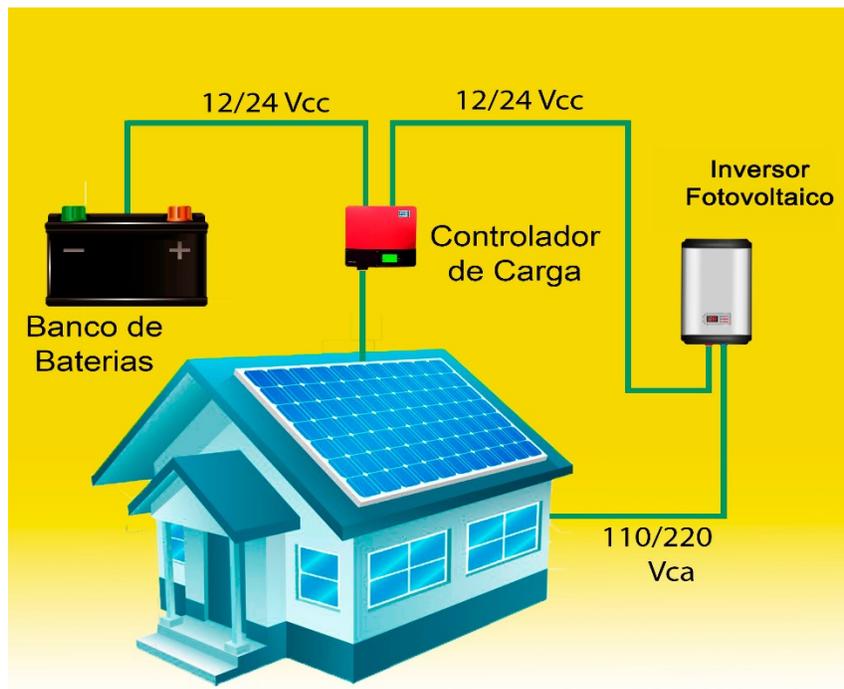
Se apresentam como uma alternativa para o fornecimento de energia a locais que por algum motivo se encontram isolados do restante do sistema elétrico. Também são considerados como uma fonte limpa para a geração de energia elétrica, visto que a mesma utiliza somente a radiação solar na geração não emitindo nenhum tipo de gás poluente que contribua para o efeito estufa. Pode-se ser utilizado de maneira distribuída com a geração da energia próximo ao local do consumo, ou de forma concentrada conectando centenas de módulos fotovoltaicos e formando usinas fotovoltaicas.

2.2.1 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica os chamados sistemas fotovoltaicos “*off-grid*”, possuem a característica de prover energia elétrica a locais sem a necessidade de estarem conectados ao restante do sistema elétrico. Existem diversos exemplos de aplicação de sistemas deste tipo, os mesmos podem utilizar baterias para o armazenamento da energia elétrica ou não, como por exemplo:

- Sistemas autônomos residenciais/rurais;
- Sinalização marítima autônoma;
- Eletricidade em embarcações;
- Iluminação e sinalização pública;
- Sistemas bombeamento autônomo;
- Eletricidade aplicações aeroespaciais;
- Eletricidade em locais de difícil acesso.

Figura 15 - Sistema Fotovoltaico "off-grid".



Na Figura 15, tem-se o esquema de uma aplicação fotovoltaica autônoma. Um conjunto de módulos fotovoltaicos conectados, para gerar maiores tensões e potência, são responsáveis por gerar uma tensão contínua (CC), o controlador de carga se encarrega de controlar a tensão e o carregamento do banco de baterias. Para utilizar a energia elétrica em aparelhos residenciais, motores, cargas que sejam alimentadas por corrente alternada (CA) em geral devem utilizar um Inversor Fotovoltaico para transformar a tensão disponível no controlador de carga CC em uma tensão alternada CA. O exemplo corresponde a uma aplicação fotovoltaica isolada autônoma completa, podendo esta possuir diversas variações dependendo da aplicação necessária, por exemplo, aplicações que alimentem cargas CC e não necessitam do Inversor Fotovoltaico; aplicações que o consumo aconteça no momento da geração e não necessitam de um banco de baterias; dentre outros.

Os SF também podem operar de forma conectada ao restante do sistema elétrico, no caso brasileiro conectado ao SIN, esses sistemas são conhecidos como sistemas fotovoltaicos “*on-grid*”. Esta aplicação pode ser utilizada para a geração de energia elétrica próxima ao local de consumo da mesma, utilizando os conceitos de geração distribuída segundo a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, permitindo aos consumidores a geração da sua própria eletricidade e entregando o excedente de sua produção ao SIN, havendo excedente o consumidor poderá utilizar o crédito em energia elétrica posteriormente. Ou de forma concentrada utilizando grandes strings de módulos fotovoltaicos conectados a centrais inversoras constituindo usinas fotovoltaicas, que entregam grandes quantidades de potência elétrica ao restante do sistema (ANEEL, 2012).

Para efeito de estudo, nesse trabalho será focado no SF que se baseiam nos conceitos de geração distribuída conforme a resolução nº 482/2012, complementada pela resolução nº 687/2015. Conforme disposições preliminares da normativa, os sistemas dividem-se em:

- Microgeração distribuída: potência instalada menor ou igual a 75 kW;
- Minigeração distribuída: potência instalada superior a 75 kW e inferior a 5MW;

- Sistema de compensação de energia elétrica: potência elétrica ativa injetada por um consumidor a rede, posteriormente compensada pela utilização de energia elétrica oferecida pela rede;
- Melhoria: instalação, substituição ou reforma de componentes do sistema de distribuição elétrica, visando manter a prestação de serviço adequada;
- Reforço: instalação, substituição ou reforma de componentes do sistema de distribuição elétrica, visando aumentar a capacidade do mesmo;
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidora;
- Geração Compartilhada;
- Autoconsumo Remoto: utilização de energia elétrica injetada na rede em um local diferente desde que pertença ao mesmo proprietário os locais de geração e consumo.

Figura 16 - Sistema fotovoltaico "on-grid".



Na Figura 16, observa-se que os módulos fotovoltaicos estão conectados diretamente ao Inversor Fotovoltaico, responsável por fazer a conexão entre a geração e o consumo da energia elétrica. Na saída do inversor a energia elétrica disponível pela geração tem dois caminhos diferentes: o consumo da energia pela própria residência ou injetar o excedente da produção no sistema de distribuição. Para quantificar e fazer o balanço entre a quantidade de energia elétrica injetada pelo consumidor à rede elétrica e a energia que o mesmo consome de rede, existe entre a conexão consumidor e rede de distribuição um medidor bidirecional, que é capaz de sensibilizar-se pela energia elétrica consumida e injetada na rede.

2.2.2 Componentes de um Sistema Fotovoltaico

Dentre os componentes utilizados para a instalação de SF serão conceituados os principais e mais importantes para o dimensionamento do sistema proposto neste estudo:

- Módulos fotovoltaicos;
- Controlador de carga;
- Banco de baterias;
- Inversor fotovoltaico;
- Medidor bidirecional.

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas associadas em série e em paralelo, conforme a Figura 17.

Figura 17 - Módulo Fotovoltaico (Canadian, 2017).

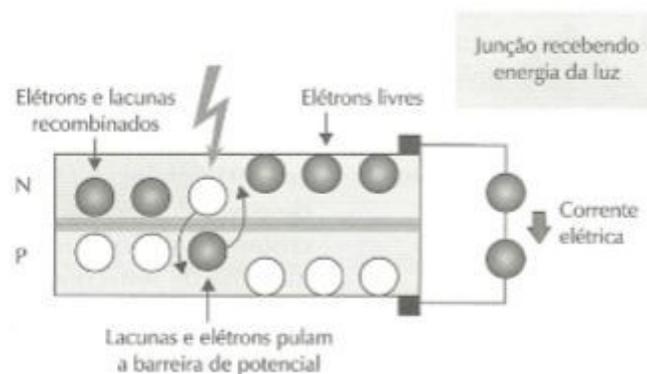


Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas conectadas em série. Por sua vez as células fotovoltaicas são constituídas por diferentes camadas de materiais semicondutores do tipo P e N, são responsáveis devido ao efeito fotovoltaico de transformar a luz ou radiação eletromagnética proveniente do Sol em energia elétrica.

Os semicondutores são materiais que não possuem as características elétricas de um condutor, tampouco de um material isolante. São caracterizados pela mudança no comportamento de suas propriedades na adição de materiais dopantes ou impurezas. As células fotovoltaicas são compostas por na parte superior uma camada semicondutora do tipo N abaixo dessa camada está um semicondutor do tipo P, formando a junção P e N

Os semicondutores do tipo N possuem isoladamente elétrons em excesso em sua camada, enquanto os semicondutores do tipo P possuem lacunas de elétrons em sua forma isolada. Quando esses materiais são colocados em contato, formando a junção P e N, os elétrons que estão em excesso no semicondutor tipo N migram para as lacunas do tipo P, gerando um campo elétrico na junção dos materiais. Isto cria a barreira de potencial, esta somente é vencida quando a luz incide sobre a célula fotovoltaica, oferecendo um caminho para os elétrons livres da camada tipo N transitarem até as lacunas do tipo P resultando no aparecimento de uma corrente elétrica no percurso conforme Figura 18 (Villalva, 2012, p.67). As células fotovoltaicas são conectadas em série para conseguirem fornecer maiores tensões de operação.

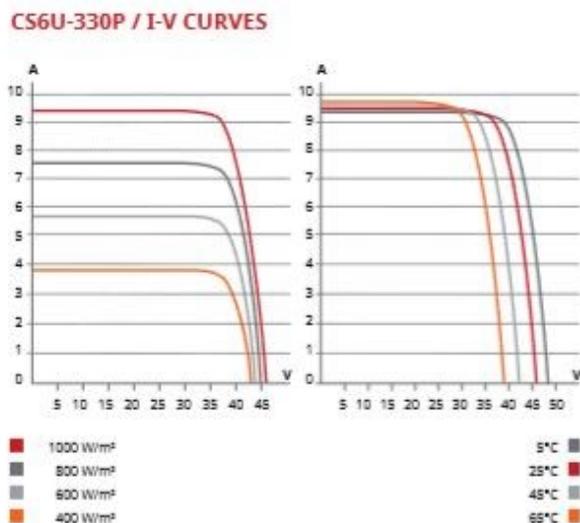
Figura 18 - Funcionamento Células Fotovoltaicas (Villalva, 2012).



Existem diversos tipos de módulos fotovoltaicos conforme o material utilizado na sua fabricação. No cenário comercial cerca de 95% dos módulos utilizados são constituídos de silício, material abundante e barato. São encontradas variações da composição dessa matéria prima na fabricação dos módulos fotovoltaicos. Os módulos fabricados com silício monocristalino, são os que utilizam o material de maneira mais pura e os que apresentam melhor eficiência. O silício policristalino também utilizado na fabricação dos módulos é obtido por um processo de fabricação mais barato do que quando comparado ao monocristalino, porém a eficiência apresentada é menor. Existem também módulos mais recentes fabricados com novas tecnologias chamadas de filmes finos, diferentemente dos produzidos a partir de lingotes de silício, estes são formados pela deposição de finas camadas de materiais (silício e outros) sobre uma base, apresentam uma eficiência semelhante aos módulos de silício policristalino (Villalva, 2012, p.69).

O módulo fotovoltaico não se comporta como uma fonte elétrica convencional de tensão constante, o mesmo apresenta variados valores de tensão de acordo com a carga conectada, corrente que transita entre os seus terminais. A relação de tensão e corrente (I-V) dos módulos são de extrema importância para análise e dimensionamento, portanto são sempre apresentadas pelos catálogos dos fabricantes Na Figura 19 são apresentadas as curvas I-V de um módulo fotovoltaico comercial.

Figura 19 - Curvas I-V Módulo Fotovoltaico Canadian (Canadian, 2017).



É importante notar alguns pontos importantes para nestas curvas. O ponto corrente de curto-circuito é aquele quando a tensão nos terminais é nula e a corrente é máxima. Outro ponto importante é o ponto de tensão de circuito aberto, a tensão apresentada nos terminais do módulo sem nenhuma carga conectada, corrente igual à zero. Além desses dois pontos, existe um único ponto para cada módulo fotovoltaico o qual o mesmo apresenta a máxima potência extraída do Sol chamado de ponto de máxima potência, idealmente os módulos devem sempre operar neste ponto da curva I-V, também importante ressaltar que para cada curva I-V existe uma curva de potência e tensão (P-V) correspondente.

Ainda sobre as curvas de operação I-V e a Figura 19, podemos observar que a mesma sofre influências devido a radiação e a temperatura apresentando variações conforme as condições climáticas. A corrente fornecida pelo módulo depende diretamente da radiação solar que incide sobre o mesmo e sua área. A temperatura influi diretamente na tensão elétrica de operação, portanto, apresentando variações de potência. A eficiência de um módulo fotovoltaico é calculada a partir da Equação 3:

$$\eta_p = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_p * 1000} \quad (3)$$

Sendo $P_{m\acute{a}x}$ a máxima potência ou potência de pico (Wp) fornecida pelo módulo e A_p a área do módulo fotovoltaico em [m²]. Essa eficiência é padronizada conforme as condições de teste padrão (STC), para utilizarem os mesmos parâmetros em diferentes modelos na análise de eficiência. As condições de STC conforme já foi citado neste estudo apresentam radiação equivalente a 1000 W/m², massa de ar AM1,5 e temperatura de 25°C. Os dados fornecidos pelos fabricantes em seus catálogos utilizam-se desses padrões para teste.

O controlador de carga é o ponto de conexão entre os módulos fotovoltaicos ao restante do sistema, responsável por estabelecer níveis de tensão de operação adequada, conforme mostra a Figura 21. Visto que os módulos têm como característica inerente ser uma fonte de tensão que varia. Item indispensável nos SF autônomos faz o controle do carregamento do banco de baterias, geralmente operando com tensões de 12/24 V, mantém a tensão do banco em níveis de permitam o seu carregamento e a desconexão das mesmas para garantir a integridade da sua vida útil.

Figura 20 - Controlador de Carga (Minha Casa Solar, 2017).



O controle pode ser feito através de proteção de sobrecarga e descarga excessiva do banco de baterias, o chamado controlador de carga convencional. Ou através de controles eletrônicos PWM e MPPT que permitem fazer o carregamento conforme o perfil de carga do banco de baterias e operar no ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico, respectivamente. Os controladores de carga eletrônicos com o recurso de MPPT possuem em média 30% melhor eficiência quando comparados aos controladores de carga convencional, isto acontece devido ao fato de sempre estarem operando no ponto de máxima de potência (Villalva, 2012, p.119).

Nos SF nem sempre o consumo da energia elétrica acontece no mesmo momento em que os módulos convertem a radiação do Sol em eletricidade. Para armazenamento da energia elétrica utilizam-se baterias conectadas em série e paralelo formando um banco de baterias como ilustrado na Figura 21. As baterias são conectadas em série para aumentar a tensão de operação do banco logo também do sistema, enquanto a conexão em paralelo acontece para aumentar a capacidade armazenamento em ampere-hora (Ah).

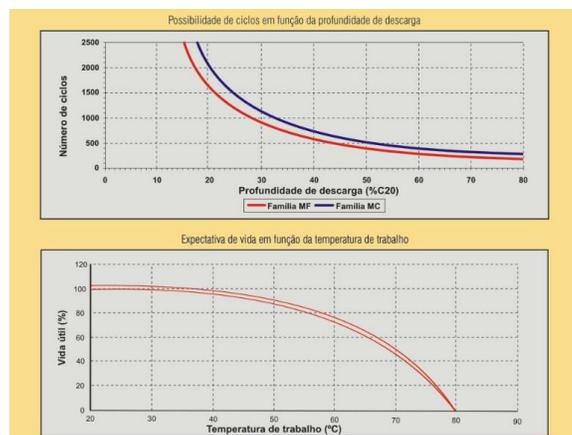
Figura 21 - Banco de Baterias (MPPT Solar, 2017).



No mercado são encontrados diversos tipos diferentes de opções de baterias para aplicações fotovoltaicas. A bateria de chumbo ácido estacionária com eletrólito líquido é a mais presente nas instalações devido ao seu reduzido custo quando comparadas ao restante, sobre as baterias de chumbo ácido elas podem utilizar ácido líquido ou em gel e podem ser abertas ou seladas. Existem ainda baterias de ciclo profundo, projetadas para sofrerem profundidade de descargas de aproximadamente 80% Villalva (2012, p.107), por exemplo: baterias de níquel-cádmio (NiCd), baterias de níquel-metal-hidreto (NiMH) e VRLA.

A profundidade de descarga de uma bateria é de suma importância para análise e dimensionamento de um sistema. Existem dois fatores que influem diretamente na vida útil de uma bateria que são a temperatura de operação e a profundidade de descarga. Os fabricantes de baterias se encarregam de fornecer no catálogo de seus produtos as informações em forma de gráfico de como esses dois fatores atuam na vida útil do equipamento, como mostra a Figura 22, um exemplo de gráfico de influência na vida útil fornecido por um fabricante.

Figura 22 - Influência na Vida-Útil de uma Bateria (Moura, 2015).



O Inversor Fotovoltaico (IF) é um equipamento eletrônico responsável por converter a tensão e corrente contínua (CC) em uma tensão e corrente alternada (CA), como ilustrado na Figura 23. Estão disponíveis no mercado diversos modelos de inversores variando em diversos aspectos, como por exemplo: classe de potência, tipos de operação e classe de tensão.

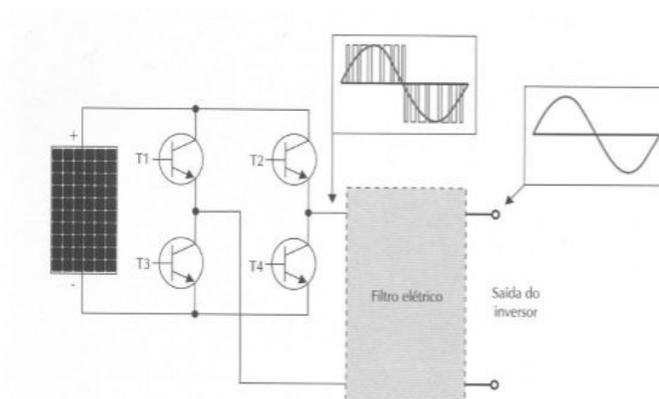
Figura 23 - Inversor Fotovoltaico Fronius "Grid-Tie" (Portal Solar, 2018).



A grande maioria dos equipamentos presentes em nos locais de trabalho, residências e no cotidiano foram feitos para serem alimentados por tensão e corrente alternadas (CA), pois é a tensão fornecida pelos sistemas convencionais. Os módulos fotovoltaicos fornecem tensão CC na saída de seus terminais, o que gera uma incompatibilidade na conexão dos equipamentos e torna o Inversor Fotovoltaico um item quase que indispensável em instalações fotovoltaicas.

O seu princípio básico de funcionamento opera com um conjunto de chaves eletrônicas conectadas aos módulos como mostra na Figura 24, que possuem como característica permitir ou bloquear o fluxo de corrente de acordo com o seu estado ligado ou desligado. Alternando o estado das chaves e o caminho do fluxo de corrente, obtêm-se uma onda de característica alternada na saída dos terminais das chaves, porém essa onda apresenta altos níveis de distorções harmônicas e não é indicada para a alimentação de equipamentos devido a interferência eletromagnética que pode causar nos mesmos.

Figura 24 - Princípio de Funcionamento Inversor Fotovoltaico (Villalva, 2012).



Equipamentos a serem utilizados devem funcionar pelo princípio da modulação por largura de pulsos (*PWM, Pulse Width Modulation*), gerando uma sequência de ondas quadradas de alta frequência e resultando em uma onda pura senoidal na frequência fundamental de 60 Hz adicionado a suas componentes harmônicas de alta frequência. Um filtro, dispositivo elétrico capaz de mitigar as componentes harmônicas, é colocado anterior a saída do inversor para que o mesmo forneça aos dispositivos ligados a ele uma onda senoidal pura na frequência de 60 Hz, no caso brasileiro.

O IF pode ser utilizado em aplicações fotovoltaicas autônomas e conectadas ao restante da rede elétrica, porém, os inversores empregados nestas aplicações deverão ser diferentes. Os IF instalados em sistemas autônomos, possuem como característica trabalharem como uma fonte de tensão para os equipamentos que serão alimentados por ele, sendo as características da forma de onda e magnitude da tensão fornecidas pelo IF ao sistema. Em aplicações conectadas à rede elétrica, deve-se preocupar com a proteção do sistema elétrico em caso de anormalidades ou manutenção do mesmo, para tanto, os IF utilizados em aplicações deste tipo funcionam como uma fonte de corrente ao restante do sistema, para que o mesmo se mantenha conectado à rede elétrica é necessário que o sistema elétrico forneça uma tensão elétrica em seus terminais, sendo esta tensão fornecida de características imposta pelo sistema elétrico.

Todos os inversores fabricados para operarem em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica possuem o recurso de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) ou rastreamento do ponto de máxima potência. O recurso permite que o sistema sempre opere no ponto que forneça a máxima potência na curva I-V dos módulos ou conjunto de módulos fotovoltaicos.

O medidor bidirecional ilustrado na Figura 25 é utilizado para fazer a conexão entre o Inversor Fotovoltaico e a rede elétrica. É dentro dele que estão contidos equipamentos necessários e capazes de mensurar a energia elétrica em [kWh] fornecida e consumida da rede elétrica, operam de maneira bidirecional.

Os medidores são instalados conforme a normatização da concessionária de energia elétrica do local e geralmente estão localizados no padrão de entrada CA e ponto de interconexão com a da rede elétrica. Os medidores bidirecionais mais sofisticados possuem recursos como o acompanhamento da geração e do consumo de energia elétrica em tempo real, por meio de relatórios e aplicativos.

Figura 25 - Medidor Bidirecional Fronius (Eco Brasil Solar, 2017).



Existem outros equipamentos e componentes a serem utilizados em SF, como cabos, conectores, equipamentos de proteção, suporte para os módulos e disjuntores, por exemplo. No entanto, no presente estudo será feita somente a conceituação dos itens acima, pois entende-se que com a assimilação destes é possível para o leitor compreender o funcionamento do sistema apresentado no próximo capítulo.

2.3 Conceitos de Iluminação

Assim como foram apresentados os conceitos mais importantes sobre energia solar no item anterior, neste item será feita uma breve apresentação de conceitos de iluminação que são de suma importância para o entendimento deste estudo e do projeto proposto nele. O embasamento teórico utilizado neste item tem como referência o livro: Iluminação – Teoria e Projetos (Délío, 2009). Os conceitos expostos serão de extrema relevância para a análise de conformidade do sistema proposto em relação a Norma ABNT NBR 5101:2012, Iluminação Pública – Procedimento.

A luz visível é composta por radiação eletromagnética, corresponde a um intervalo de comprimento de onda no espectro eletromagnético em que o olho humano é capaz de se sensibilizar. O intervalo de comprimento de onda corresponde de 380 nm (nano-metros) a 760 nm (Délio, 2009, p.15).

A principal responsável pela redução de eficiência visual, a fadiga ocular, pode ser provocada por fatores diretamente subordinados à iluminação. O esforço visual prolongado parece produzir uma dilatação residual na pupila, só recuperável pelo sono diário. Estudos mostraram que uma iluminação adequada, além de melhorar o conforto visual, reduz a tensão nervosa e os casos de fadiga crônica que levaram pacientes à insônia ou outros efeitos perturbadores do sistema nervoso. (Délio, 2009, p.16)

O fluxo luminoso pode ser definido como a quantidade de energia radiante de uma fonte luminosa, em relação a uma unidade de tempo e a sensação luminosa produzida (Délio, 2009, p.25). O fluxo luminoso (F) tem como unidade de medida o lúmem (lm).

Um parâmetro importante para avaliação na qualidade de sistemas de iluminação é a eficiência luminosa (η), de acordo com a Equação 4. Expresso em lúmem por Watts (lm/W) mede a quantidade de energia radiante por unidade de potência elétrica.

$$\eta = \frac{\text{Fluxo Luminoso Emitido}}{\text{Potência Absorvida pela Fonte}} \quad (4)$$

As fontes luminosas quando são observadas em sua proximidade possuem um formato característico de acordo com as suas dimensões físicas, no entanto, quando estas são observadas a partir de uma certa distância passam a ter uma característica puntiforme. Isto ocorre, pois, o fluxo luminoso gerado pelas fontes irradia em todas as direções.

A intensidade luminosa (I) trata-se da medida do fluxo luminoso em uma única direção, geralmente obtida em laboratório essa unidade é de extrema importância para a mensuração da eficiência das luminárias. A unidade utilizada para definir a intensidade luminosa das fontes é a candela (cd).

A Iluminância (E) é definida como a densidade de fluxo luminoso incidente sobre uma área. A unidade que expressa essa medida é lúmen por metro quadrado (lm/m^2) também conhecida como lux (lx).

Existe uma lei conhecida como Lei de Lambert, ou lei da incidência, que estabelece que:

- O iluminamento varia na razão direta da intensidade luminosa;
- O iluminamento varia na razão inversa do quadrado da distância.

Esta expressão é utilizada para cálculo do iluminamento horizontal, conforme a Equação 4, conhecida como método do ponto a ponto (Délío, 2009, p.29).

$$E = \frac{dF}{dS} = \frac{I \cos \alpha}{d^2} \quad (4)$$

A luminância (L) é a grandeza responsável por mensurar a intensidade luminosa refletida por um objeto variando em cada área do objeto. A sua unidade de medida é candela por metro-quadrado (cd/m^2).

A luminância caracteriza a visibilidade de objetos iluminados e noções de profundidade devido a reflexão da intensidade luminosa nestes. Regiões de maior ou menor quantidade de luz fornecem a percepção de relevo e de posição relativa devido a luminância.

3. Eficiência Energética na Iluminação Pública

O sistema fotovoltaico integrado com uma iluminação pública LED, tratado neste estudo como uma alternativa na forma de obtenção de energia elétrica de maneira limpa e de utilização eficiente, será apresentado neste capítulo. Também serão abordados o seu dimensionamento, equipamentos necessários para a sua instalação e uma análise financeira do tempo de retorno do capital investido.

O objetivo deste estudo se justifica no crescente investimento de recursos financeiros e tecnológicos em formas de utilização da energia elétrica de maneira mais consciente, devido a grande evolução do consumo para suprir as necessidades da vida humana moderna. Na cidade em que este estudo é realizado, Uberlândia (MG), segundo o edital de uma Chamada Pública do ano de 2017 o município conta com 84.636 pontos de iluminação, sendo que a lâmpada mais utilizada ainda é a vapor de sódio (PROCE, 2018).

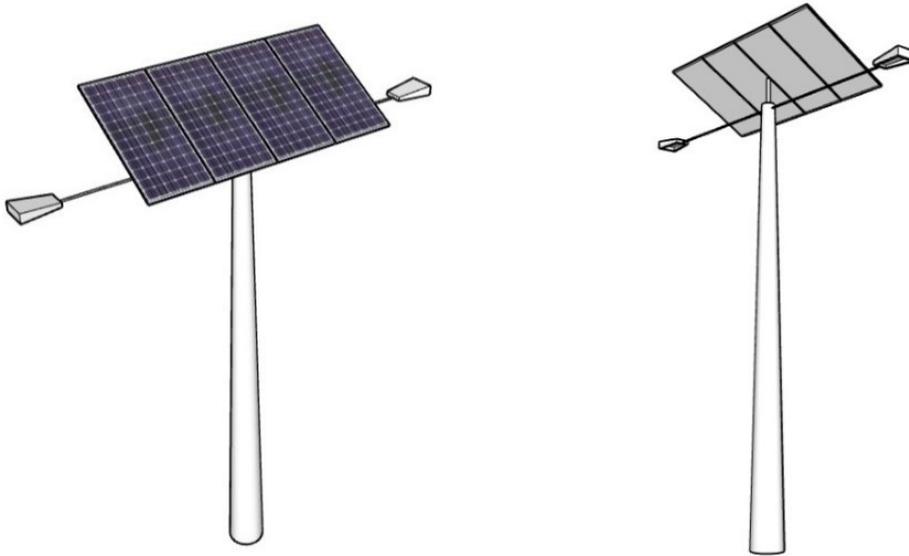
Em Belo Horizonte, projeto semelhante de modernização da iluminação pública prevê um investimento R\$ 1 bilhão nos próximos 20 anos entre recursos públicos e privados. O contrato com a concessionária da licitação, que teve início em dezembro do ano passado, prevê a troca de 182 mil pontos onde há lâmpadas de vapor de sódio por luminárias de LED (até 75% mais econômicas) até o fim de 2020. A estimativa é de uma economia anual de R\$ 25 milhões.

3.1 Dimensionamento do Sistema de Iluminação Pública Fotovoltaica

3.1.1 O Sistema

O sistema fotovoltaico integrado à iluminação pública proposto será disposto conforme a Figura 26.

Figura 26 - Sistema Fotovoltaico Integrado a Iluminação Pública.



O sistema apresentado neste capítulo será dimensionado a partir do “Método da Insolação” apresentado por Villalva (2012, p.135), além de uma luminária de LED. O método aplicado é o adequado para dimensionamento de SF que contam com o recurso de MPPT. O mesmo é composto por:

- 2 Microinversores APSsystems YC500 (com recurso de MPPT);
- 4 painéis fotovoltaico Canadian 330Wp;
- 2 Luminária LED Lumicenter 113W.

Para fins de dimensionamento utiliza-se a Equação 5:

$$E_p = E_s * A_m * \eta_m \quad (5)$$

A Equação 5 nos permite calcular a energia produzida (Ep) em kilo-watt-hora [kWh], a partir de dados da insolação (Es) em kilo-watt-hora por metro quadrado por dia [kWh/m²/dia], da área ocupada pelos painéis fotovoltaicos (Ap) expressa em [m²] e a eficiência dos mesmo (ηm). Os dados relativos a insolação que serão utilizados neste estudo estão presentes no Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II da Cemig (2016, p.80), que expressam os dados de insolação anual para a cidade de Uberlândia (MG) obtidos a partir de satélite como 5,3 [kWh/m²/dia]. A partir disto e das informações sobre os painéis utilizados contidas no Anexo I, aplicando a Equação 5:

$$Ep = 5,3 * 4 * 0,96 * 1,99 * 0,1697 = 6,87 kWh$$

Para expressar a energia produzida e anos (Ep'):

$$Ep' = Ep * 365 dias = 2.508,62 kWh$$

3.1.2 Módulo Fotovoltaico

O Módulo Fotovoltaico escolhido para ser utilizado trata-se de um modelo da marca Canadian Solar modelo CS6U-330, de acordo com a Figura 27. Serão instalados 4 módulos fotovoltaicos deste, colocados sobre a estrutura de um poste de iluminação pública. Serão instalados com a face voltada para o norte geográfico e inclinação $\alpha = 18^\circ$, seguindo os critérios de melhor aproveitamento da energia emitida pela radiação solar apresentados anteriormente no item 2.1.6.

Figura 27 - Módulo Fotovoltaico Canadian Solar CS6U 330 (Minha Casa Solar, 2018).



O modelo escolhido é composto por células de silício do tipo policristalino e apresenta eficiência de 16,97%. A sua potência máxima nominal é igual a 330W e tensão de circuito aberto igual a 45,6V, características elétricas importantes para o dimensionamento e a compatibilidade da escolha do Inversor Fotovoltaico utilizado no sistema. Dados importantes sobre as características elétricas apresentadas sob características de teste padrão (STC) são apresentados abaixo na Figura 28.

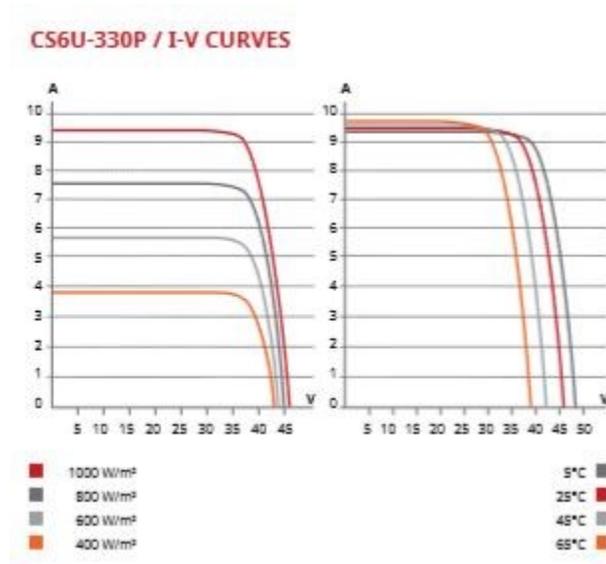
Figura 28 - Características Elétrica Painel (Fonte: Canadian Solar cs6u).

ELECTRICAL DATA STC*				
CS6U	325P	330P	335P	340P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.0 V	37.2 V	37.4 V	37.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.78 A	8.88 A	8.96 A	9.05 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.5 V	45.6 V	45.8 V	45.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.34 A	9.45 A	9.54 A	9.62 A
Module Efficiency	16.72%	16.97%	17.23%	17.49%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

As curvas IxV que devem ser obrigatoriamente apresentadas nos catálogos dos fabricantes de módulos fotovoltaicos são apresentadas abaixo na Figura 29. As curvas são de extrema relevância para definir o ponto de operação do módulo em que ele apresente a máxima extração de potência e como os fatores como irradiação e temperatura afetam esses equipamentos. Demais informações sobre este módulo encontram-se no datasheet do produto no Anexo I no final deste trabalho.

Figura 29 - Curvas IxV Painel Fotovoltaico (Canadian Solar).



3.1.3 Inversor Fotovoltaico

O Inversor Fotovoltaico escolhido para ser utilizado no sistema será um microinversor modelo YC500A da marca APSystems, ilustrado na Figura 30. Os microinversores do modelo possuem a classificação IP67 o que garante que o mesmo possa ser utilizado em ambientes externos, além de manter a máxima potência até a temperatura de 65°C, podendo estar acoplados aos módulos fotovoltaicos sem perder a eficiência devido as altas temperaturas.

Figura 30 - - Microinversor Fotovoltaico APSystems (Minha Casa Solar, 2018).



Para dimensionamento do sistema devem ser observados as características elétricas de cada equipamento utilizado na instalação. O SF possui 4 módulos fotovoltaicos Canadian 330Wp com tensão de circuito aberto igual é 45,6V e corrente de curto-circuito igual à 9,45A. Para que o sistema seja compatível e opere normalmente serão instalados 2 microinversores a cada 2 módulos fotovoltaicos. Os microinversores contam com tensão CC de entrada máxima igual à 55V e a máxima corrente CC de entrada igual à 2x12A conforme nos mostra a Figura 31. Portanto cada módulo deve ser conectado individualmente a sua entrada CC.

Informações importantes sobre características elétricas e mecânicas sobre o aparelho se encontram no Anexo II.

Figura 31 - Características Elétricas Microinversor (Minha Casa Solar, 2018).

Modelo	Brazil	
	YC500A-BR	YC500A-127-BR
Dados de Entrada (CC)		
Faixa de tensão de MPPT	22V-45V	
Faixa de tensão de Operação	16V-52V	
Máxima tensão de entrada	55V	
Tensão de ligamento	22V	
Máxima corrente de entrada	12A x 2	
Dados de Saída (AC)		
Potência de saída Nominal CA	500W	
Tensão de saída Nominal	220V	127V
Corrente de Saída Nominal	2.27A	3.94V
Faixa de Tensão de Saída Padrão	176V-242V	101.6V-139.7V
Faixa de Tensão de Saída Estendida	150V-298V	82V-155V
Saída de Frequência Nominal	60Hz	
Faixa de Frequência de Saída Padrão	57.5Hz-62Hz	
Faixa de Frequência de Saída Estendida	55.1Hz-64.9Hz	
Fator de Potência	>0.99	
Distorção Harmônica Total	<3%	
Eficiência		
Eficiência Pico	95.5%	95%
Consumo de Energia à Noite	120mW	

Outra vantagem que os microinversores apresentam dos demais é em relação a sua instalação que pode ser feita acoplada aos módulos fotovoltaicos utilizando o seu sistema de aterramento, o mesmo possui o seu chassis conectado ao fio terra de proteção (PE) do cabo AC. Os módulos fotovoltaicos devem ser instalados em pares nos microinversores como mostra a Figura 32.

Figura 32 - Acoplamento Microinversor no Módulo Fotovoltaico (Minha Casa Solar, 2018).



3.1.4 Painel Led

Devido a extrema importância da utilização da melhor maneira possível os recursos energéticos disponíveis, surge a preocupação com a eficiência dos equipamentos que são utilizados na IP. No município de Uberlândia (MG), das 84.636 luminárias de IP espalhadas pela cidade 43.822 ainda utilizam a tecnologia vapor de sódio. Na cidade uma parceria pública privada (PPP) foi montada com o objetivo de substituição dos equipamentos defasados utilizados na iluminação, por luminárias que apresentam uma melhor eficiência energética mantendo os níveis de iluminação adequado (PROCEL, 2017).

Em substituição as luminárias de vapor de sódio atualmente utilizadas, propõe-se a instalação de luminárias led. O painel utilizado no dimensionamento e na simulação a ser apresentado posteriormente é o Painel LED LEX01-S3M750 da fabricante Lumicenter e apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Painele Led LEX01-S3M750. (Lumicenter, 2018).



Este painel de led é composto por 3 módulos que somados possuem a potência de 113W e o fluxo luminoso de 12150lm o que gera uma eficácia de 108lm/W. Ainda segundo o fabricante o equipamento, assim como o restante do sistema, possui índice de proteção IP67 o que garante sua utilização ao ar livre. Pode ser utilizado na substituição de luminárias de vapor de sódio de 250W.

Assim como estas, outras informações importantes sobre o equipamento estão disponíveis no site do fabricante Lumicenter (2018).

3.2 Comparação dos Requisitos da NBR5101

Para que a iluminação de um local seja estabelecida de tal maneira a propiciar o maior conforto e segurança aos usuários, existem regras que determinam os níveis de iluminação adequado de acordo com o local da instalação. No caso brasileiro, a regulamentação em nível nacional para a IP se ampara na norma brasileira ABNT NBR 5101:Iluminação Pública – Procedimento, elaborada em 04 de abril de 2012 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3.2.1 ABNT NBR 5101: Iluminação Pública - Procedimento

Neste item serão apresentados alguns conceitos e atribuições contidos na NBR 5101 que são de extrema importância para o dimensionamento e a instalação de sistemas de IP. Para que os mesmos se encontrem em um padrão que garanta a segurança e o conforto dos usuários devem atender aos requisitos:

- a) redução de acidentes noturnos;
- b) melhoria das condições de vida, principalmente nas comunidades carentes;
- c) auxílio à proteção policial, com ênfase na segurança dos indivíduos e propriedades;
- d) facilidade do fluxo do tráfego;
- e) destaque a edifícios e obras públicas durante à noite;
- f) eficiência energética (ABNT, 2012, p.7).

- Fator de Uniformidade da Iluminância (U)

O fator de uniformidade da iluminância (em determinado plano) U é determinado pela razão entre a iluminância mínima (E_{min}) e a iluminância média (E_{med}) em um determinado plano é definido conforme a Equação 6.

$$U = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (6)$$

- Fator de Uniformidade da Luminância (U_0)

O fator de uniformidade da luminância (uniformidade global) U_0 é a razão entre a luminância mínima (L_{min}) e a luminância média (L_{med}) em um plano especificado, conforme a Equação 7.

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{med}} \quad (7)$$

- Fator de Uniformidade da Luminância (U_L)

O fator de uniformidade da luminância (uniformidade longitudinal) U_L é dado pela razão entre a luminância mínima ($L_{mín}$) e a luminância máxima ($L_{máx}$) ao longo das linhas paralelas ao eixo longitudinal da via em um plano especificado, dado pela Equação 8.

$$U_L = \frac{L_{mín}}{L_{máx}} \quad (8)$$

- Luminância média (L_{med})

A luminância média (L_{med}) é o valor média da luminância na área determinada pela malha de pontos considerada e expressa em [cd/m²].

- Luminância de velamento (L_V)

A luminância de velamento (L_V) é o efeito provocado pela luz incidente sobre o olho do observador no plano perpendicular à linha de visão.

- Incremento Limiar (TI)

O incremento limiar é a limitação do ofuscamento perturbador, que afeta a visibilidade dos objetos. O mesmo é dado pela Equação 9:

$$TI\% = 65 * \frac{L_V}{(L_{med})^{0,8}} \quad (9)$$

- Razão das áreas adjacentes as vias (*SR*)

Relação entre a iluminância média das áreas adjacentes a via e a iluminância média em ambos os lados de suas bordas (ABNT, 2012).

- Classificação das vias de trânsito

A classificação das vias de trânsito a seguir obedecem às disposições previstas no Código de Trânsito Brasileiro:

a) vias urbanas:

- Via de trânsito rápido;
- Via arterial;
- Via coletora;
- Via local.

b) vias rurais:

- Rodovias;
- Estradas.

Estas vias são classificadas conforme o volume de tráfego existente na mesma, conforme estabelecido na Figura 34.

Figura 34 - Volume de Tráfego nas Vias (ABNT, 2012. Adaptado).

Classificação	Volume de tráfego noturno a de veículos por hora, em ambos os sentidos b, em pista única.
Leve (L)	150 a 500
Médio (M)	501 a 1200
Intenso (I)	Acima 1201

Ainda segundo a norma ABNT NBR 5101, as vias de trânsito podem ser classificadas, para fins de iluminação, de acordo com a Figura 36 exposta a seguir:

Figura 35 - Classe de Iluminação das Vias (ABNT, 2012. Adaptado).

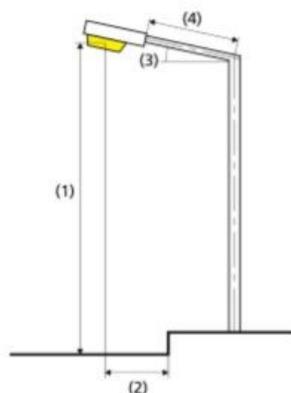
Descrição da Via					
Vias de trânsito rápido; vias de alta velocidade de tráfego, com separação de pistas, sem cruzamentos em nível e com controle de acesso; vias de trânsito rápido em geral; Auto-estradas			Vias coletoras; vias de tráfego importante; vias radiais e urbanas de interligação entre bairros, com tráfego de pedestres elevado		
Leve	médio	intenso	leve	médio	intenso
	V2	V1	V4	V3	V2
Vias arteriais; vias de alta velocidade de tráfego com separação de pistas; vias de mão dupla, com cruzamentos e travessias de pedestres eventuais em pontos bem definidos; vias rurais de mão dupla com separação por canteiro ou obstáculo			Vias locais; vias de conexão menos importante; vias de acesso residencial		
Leve	médio	Intenso	leve	médio	intenso
	V2	V1	V5	V4	

3.2.2 Distribuição das Luminárias

As luminárias de LED da fabricante Lumicenter modelo LEX01-S3M750 serão instaladas sobre a estrutura de um poste a uma altura em relação a via (1) de 8m, conforme ilustra a Figura 36. A distância do foco central da luminária projetada na via em relação ao início da mesma (2) equivale a 1m, a inclinação da luminária instalada perpendicularmente no poste (3) é de 0°. Por fim, o comprimento do braço extensor do poste mede 2,75m. Em cada poste será instalado um par de luminárias deste modelo.

Figura 36 - Disposição da Luminária LED LEX01-S3M750. (DIALux, 2018).

LUMICENTER LEX01-S3M750



Outro aspecto necessário de ser determinado no dimensionamento e análise do Sistema trata-se da distância em que as luminárias devem ser instaladas uma das outras e as dimensões físicas da via a ser instalada. Sempre com a preocupação de manterem os níveis de iluminação adequados às normas, visando o conforto e segurança do usuário. Utilizando equipamentos com a melhor eficiência possível, a fim de garantir o uso sustentável da energia elétrica.

As luminárias serão distribuídas ao longo das vias, conforme a Figura 37. Informações importantes sobre o modelo de luminária utilizada e sua distribuição ao longo da via se encontram no Anexo III, no final deste trabalho.

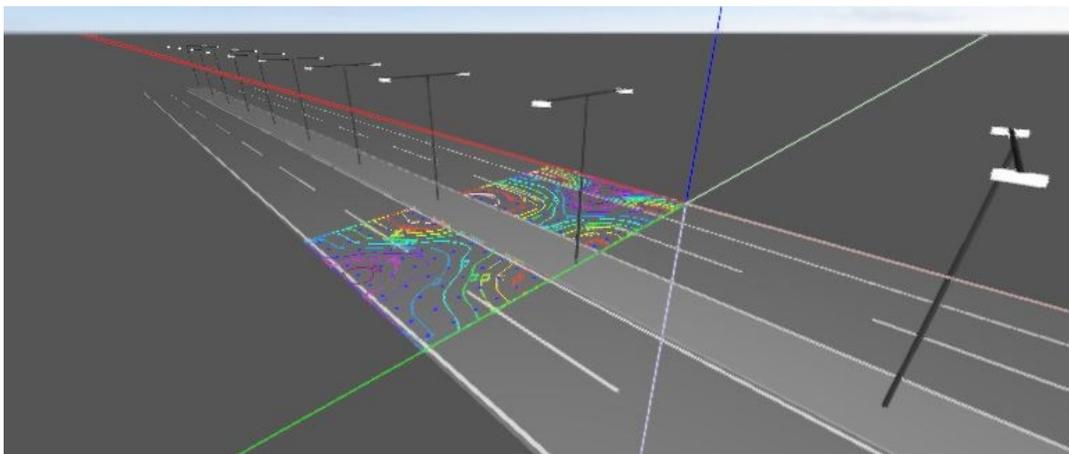
Figura 37 - Distribuição Luminárias na Via. (DIALux, 2018).



3.2.3 Projeto Luminária Led DIALux

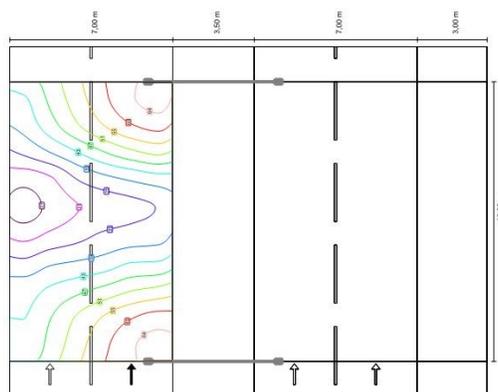
Para estabelecimento os parâmetros de iluminação fornecido pela luminária utilizada no projeto foi utilizado o software DIALux evo da empresa alemã Dial. O mesmo se baseia nas especificações fotométricas fornecidos pelos fabricantes das luminárias em um arquivo do tipo IES, para realizar o dimensionamento do número de luminárias necessárias conforme os padrões estabelecidos na norma. Na Figura 38 têm-se a ideia da disposição das luminárias na via, projeto simulado com o auxílio do software DIALux evo.

Figura 38 - Projeto Luminárias DIALux. (DIALux, 2018).



Os postes com as luminárias instaladas estarão dispostos a uma distância de 12m, um em relação ao outro, conforme mostra a Figura 39. Além disso, as isolinhas da Pista de Rodagem 2 nos mostram informações sobre a iluminância horizontal na via.

Figura 39 - Projeto Isolinhas Via M2.(DIALux, 2018).



A iluminância horizontal das vias é determinada a partir de uma malha 10x6 dispostos por pontos equidistantes ao longo do intervalo entre duas luminárias, como mostra a Figura 40. Outras informações a respeito dos parâmetros luminotécnicos da via serão apresentados ao decorrer deste trabalho, e também estarão presentes nos Anexo III e Anexo IV.

Figura 40 - Malha de Iluminância Horizontal.(DIALux, 2018).

Horizontal illuminance [lx]										
19.917	43.8	43.3	41.7	36.4	30.0	25.1	28.4	36.0	40.8	43.2
18.750	48.8	47.4	44.2	38.9	32.1	28.3	30.5	39.4	45.9	48.5
17.583	54.0	52.2	46.6	40.0	34.0	31.1	35.2	43.3	51.3	53.9
16.417	58.8	56.2	49.0	41.2	36.0	32.7	37.9	47.4	55.8	58.9
15.250	63.1	59.7	51.6	43.6	37.0	34.0	39.6	50.6	59.5	63.2
14.083	65.6	61.6	53.1	44.0	37.8	35.5	41.2	52.5	61.3	65.5
m	0.600	1.800	3.000	4.200	5.400	6.600	7.800	9.000	10.200	11.400

Grid: 10 x 6 Points

3.2.4 Comparação dos Resultados com a Norma NBR 5101

A norma brasileira ABNT NBR 5101:2012, Iluminação Pública – Procedimento, diz que as classes de iluminação são selecionadas de acordo com a função da via, da densidade de tráfego, da complexidade do tráfego, da separação do tráfego e da existência de facilidades para o controle do tráfego, como os sinais (ABNT, 2012). Para cada classe de iluminação existe um padrão de iluminação mínimo a ser obedecido, de acordo com a Figura 41.

Figura 41 - Classe de Iluminação (ABNT, 2012 Adaptado).

Classe de Iluminação	L_{med}	$U_o \geq$	$U_L \leq$	TI%	SR
V1	2,00	0,40	0,70	10	0,5
V2	1,50	0,40	0,70	10	0,5
V3	1,00	0,40	0,70	10	0,5
V4	0,75	0,40	0,60	15	-
V5	0,50	0,40	0,60	15	-

Analisando a Tabela exposta anteriormente no item 3.2.1 será considerado para o projeto como classe de iluminação a V2, pois trata-se de um sistema a ser instalado em vias arteriais de trânsito médio ou vias coletoras de trânsito intenso. Fazendo um comparativo entre os padrões pré-estabelecidos na norma e os resultados obtidos na simulação do projeto com o auxílio do software DIALux, obtive-se os seguintes resultados, conforme a Figura 42.

Figura 42 - Comparativo Norma x Resultados.

L_{med}	$U_o \geq$	$U_L \leq$	TI%	SR	
1,5	0,4	0,7	10	0,5	Norma
1,54	0,59	0,67	2	0,73	Resultados

De acordo com a Figura 43, pode-se observar que os resultados do projeto do sistema proposto respeitam os limites impostos pela norma. Dessa maneira garante-se as condições para que a IP exerça o seu papel levando segurança e conforto ao dia-a-dia do usuário. Outras informações relativas aos resultados obtidos pelas luminárias LED encontram-se no Anexo III.

3.3 Análise do Projeto

Neste item será elaborada uma análise financeira do projeto, considerando o capital investido, o tempo de retorno desse capital em função do retorno devido a geração (SF) e conservação de energia elétrica (IP), e as taxas de juros. Para este estudo será utilizado como referência o livro da Eletrobrás/PROCEL, “Conservação de Energia – Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações”, elaborado em 2006 que visa estabelecer parâmetros para utilização da energia elétrica de maneira eficiente.

3.3.1 Análise Financeira

Para elaboração da análise será necessário utilizar alguns parâmetros que já foram calculados neste estudo e outros que serão definidos aqui. De acordo com Eletrobrás e PROCEL (2006, p.208), o tempo de retorno de capitalizado, considerando as taxas de juros do capital investido, é dado pela Equação 10:

$$n = -\frac{\ln(1-\frac{I}{A} * i)}{\ln(1+i)} \quad (10)$$

Em que o tempo de retorno capitalizado (n) é função do investimento financeiro realizado (I), da economia anual obtida pelo sistema (A) e das taxas de juros (i) vigentes.

Para determinar o investimento financeiro (I) realizado os valores dos equipamentos utilizados na instalação estão na Figura 44 a seguir:

Equipamento	Qtde	Preço	Total
Painel Fotovoltaico Canadian 330Wp	4	R\$ 729,00	R\$ 2.916,00
Microinversor YC500	2	R\$ 1.397,50	R\$ 2.795,00
Painel Led Lumicenter 113W LEX01S3M750	2	R\$ 1.301,22	R\$ 2.602,44
			R\$ 8.313,44

Figura 43 - Tabela Preço dos Equipamentos do Sistema.

Para calcular a economia anual (A) deverá ser considerado a economia anual devido a geração de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos (SF) e também pela economia de energia elétrica na substituição por luminárias mais eficientes (IP).

A energia produzida (E_p) foi determinada no item 3.1.1 deste estudo.

$$E_p = 2.508,62 \text{ kWh}$$

Para calcular a economia anual devido ao SF, será utilizado a tarifa B1 da concessionária de energia elétrica Cemig, conforme a Figura 44.

Figura 44 - Tarifa B1 Cemig (Cemig, 2018).

B1- RESIDENCIAL NORMAL	 Consumo R\$/kWh	 Consumo R\$/kWh	 PATAMAR 1 Consumo R\$/kWh	 PATAMAR 2 Consumo R\$/kWh
Residencial Normal (Consumo R\$/kWh)	0,58684	0,59684	0,61684	0,63684

$$Eco_{SF} = Ep * Tarifa B1 \quad (11)$$

$$Eco_{SF} = 2.508,62 * 0,58684 = R\$ 1.472,16$$

Para determinar a economia anual devido a substituição dos sistemas de IP por luminárias LED mais eficientes, deve-se considerar a economia em energia elétrica das lâmpadas e o tempo de utilização anual das mesmas.

$$Ep'' = (Pot_{HPS} - Pot_{LED}) * t_{op} \quad (12)$$

$$Ep'' = (2 * 250 - 2 * 113) * 4000 = 1096 kWh$$

A tarifa utilizada no caso da IP pela Cemig é a B4. Com os valores definidos pela Figura 46.

Figura 45 - Tarifa B4 Cemig (Cemig, 2018).

B4 - ILUMINAÇÃO PÚBLICA	 Consumo R\$/kWh	 Consumo R\$/kWh	 PATAMAR 1 Consumo R\$/kWh	 PATAMAR 2 Consumo R\$/kWh
Iluminação Pública - B4a - Rede de Distribuição	0,32277	0,33277	0,35277	0,37277
Iluminação Pública - B4b - Bulbo da Lâmpada	0,35211	0,36211	0,38211	0,40211

Portanto, fazendo a multiplicação da tarifa de IP pela energia economizada, obtêm-se:

$$Eco_{IP} = Ep'' * Tarifa_{B4} \quad (13)$$

$$Eco_{IP} = 1096 * 0,35211 = R\$ 353,76$$

Agora que já foi definida a economia anual dos sistemas separadamente, pode-se fazer a soma delas, obtendo assim a economia anual (*A*).

$$A = Eco_{SF} + Eco_{IP} \quad (14)$$

$$A = 1.472,16 + 353,76 = R\$1.825,91$$

Como último parâmetro utilizado, também foi determinada uma taxa de juros (*i*) a ser considerada, caso o capital não fosse investido neste sistema, a taxa na qual o mesmo renderia em uma aplicação. Para a análise do sistema proposto será utilizada a taxa base de juros SELIC.

$$i = 6,4 \% a. a.$$

Os parâmetros expostos que servirão de base para o cálculo do tempo de retorno capitalizado (*n*), foram organizados conforme a Figura 46.

Figura 46 - Parâmetros do TRC.

Investimento (I)	R\$	8.313,44
Economia anual (A)	R\$	1.825,91
Energia produzida (Ep) [kWh]		2508,62
Tarifa CEMIG [R\$/kWh]		0,59
Economia anual SF [R\$]		1472,16
Energia economizada IP [kWh]		1096,00
Tarifa CEMIG IP [R\$/kWh]		0,32
Economia anual IP [R\$]		353,76
Tempo retorno simples (TRS) [a]		4,55
Taxa de Juros (i) [% a.a]		0,06

a) Tempo de Retorno Simples (TRS)

O tempo de retorno simples não considera as taxas de juros aplicadas ao capital. Trata-se de uma relação simples entre o investimento e a economia anual.

$$TRS = \frac{I}{A} \quad (15)$$
$$TRS = \frac{8313,44}{1825,91} = 4,55 \text{ anos}$$

b) Tempo de Retorno Capitalizado (TRC)

Utilizando a Equação 10 exposta anteriormente e os parâmetros organizados na tabela é possível o cálculo do tempo de retorno capitalizado do investimento feito no sistema.

$$n = -\frac{\ln(1 - \frac{I}{A} * i)}{\ln(1 + i)}$$
$$n = 5,55 \text{ anos}$$

De acordo com a Eletrobrás e PROCEL (2006, p.208), o valor presente líquido (VPL) disponível a cada ano pode ser mensurado, e para obter o tempo em que o valor investido se iguala ao VPL utiliza-se da equação. Variando VPL em função do tempo obtém-se o Gráfico mostrado na Figura 48, a partir do mesmo é possível observar o comportamento financeiro do investimento realizado.

Conforme Figura 47, observa-se que em até 5,55 anos o investimento será negativo. A partir do 6º ano o valor presente líquido da instalação passa a ser positivo. Caso a vida útil do sistema seja maior que o TRC, pode-se assim dizer que será um sistema viável financeiramente.

Figura 47 - Gráfico Tempo Retorno Capitalizado.



CONCLUSÃO

Ao ser elaborada a proposição de um projeto de sistema fotovoltaico integrado com a iluminação pública, têm-se como objetivo a utilização da energia elétrica de maneira eficiente. Em tempos vividos de escassez de recursos naturais e problemas relacionados ao aquecimento global, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma opção na forma de obtenção de energia elétrica. Uma fonte limpa e renovável de energia que utiliza a energia proveniente da radiação solar para convertê-la em energia elétrica. Além disso, é notória a evolução das tecnologias empregadas na iluminação, porém em um panorama geral as luminárias espalhadas pelos municípios brasileiros em sua maioria encontram-se defasadas, o que ocasiona um desperdício de energia elétrica. Aliado a isso as normas regulamentadoras permitem a conexão de sistemas de geração de energia fotovoltaica na rede de distribuição, o que facilita a geração e conexão para consumidores comuns, inclusive para o sistema proposto neste estudo que integra a geração de energia elétrica a partir de uma fonte limpa (sistemas fotovoltaicos), com a utilização da mesma de maneira eficiente (iluminação pública LED).

No capítulo 1, foi feita uma introdução sobre a matriz energética e iluminação pública brasileira. Foi elaborado um mapeamento da iluminação pública e da matriz energética. O Brasil, apesar de concentrar a sua produção de energia elétrica em uma fonte hidráulica renovável, apresenta um enorme potencial para a energia fotovoltaica, devido aos ótimos níveis de insolação, o que deve ocasionar um grande crescimento no setor nos próximos anos. Tanto a iluminação pública como a energia elétrica, apresentou-se não somente como itens indispensáveis para garantir a vida moderna, mas também como objetos de inserção social, tendo relação direta com o nível de qualidade de vida dos seus usuários.

No Capítulo 2, foi feita a explanação dos conceitos utilizados durante o trabalho. Expostos os conceitos de sistemas fotovoltaicos e de iluminação, teve o objetivo de conceituar parâmetros em relação ao sistema proposto, que posteriormente foram utilizados para dimensionamento e comparação com as normas regulamentadoras.

Por fim, no Capítulo 3, o sistema é implementado como um todo e os principais equipamentos utilizados são dimensionados. Também foi feita uma apresentação dos conceitos de iluminação presentes na norma NBR ABNT 5101:2012 que serviram de referência para os resultados obtidos na simulação, feita com o auxílio do software DIALux. Após obtido os resultados desejáveis de iluminação, realizou-se uma análise financeira do sistema, para determinar em quanto tempo o capital investido, considerando as taxas de juros, retornará para o investidor, considerando a geração de energia elétrica e eficiência energética das novas luminárias. Pode-se constatar que:

- Do ponto de vista ambiental, o sistema proposto e analisado neste estudo, apresenta-se como uma alternativa na geração de energia elétrica e uso consciente da mesma. Pois, a energia solar se mostra como uma fonte de energia limpa, ainda pouco explorada, principalmente ao se considerar o Brasil, país com grande extensão territorial e com ótimos níveis de irradiação solar pela sua extensão. Importante considerar que o sistema pode ser instalado em postes de iluminação de avenidas, tornando assim possível exponenciar a utilização do mesmo pelas cidades, o que permite uma maior contribuição da energia solar na parcela de geração de energia elétrica.
- Pode-se analisar a energia elétrica e a iluminação pública, como além de fatores intrínsecos à vida moderna, mas também como índices de qualidade de vida de um local. Observou-se neste estudo que os pontos de exclusão de energia elétrica, coincidem com zonas territoriais de baixo nível de desenvolvimento socioeconômico. O mesmo é dito da iluminação pública que também deve ser considerada como um fator social, indispensável para a segurança dos locais.
- Ao ser feita uma análise financeira do sistema como um todo, foi constatado que o mesmo possui um retorno financeiro simples de 4,55 anos e um retorno capitalizado de 5,55 anos. Sistemas fotovoltaicos, geralmente possuem uma vida útil de aproximadamente 20 anos de duração, o que faz com que o sistema proposto seja uma ótima alternativa econômica. Importante também ressaltar neste momento, que o sistema podendo multiplicar a sua instalação, pode significar uma parcela significativa na geração de energia elétrica, impedindo ou adiando a construção de novas usinas e linhas de transmissão de energia elétrica.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ELETROBRAS. “**Edital de Chamada Pública: Projetos de Iluminação Pública – Procel Reluz**”. 2017. Disponível em <
http://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/Chamada_Publica_Procel_Reluz/Edital_Chamada_Publica_Procel_Reluz_2017.pdf>. Acesso 20/03/2018.

ANEEL. “**Resolução Normativa nº 414**”. 2010. Disponível em <
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso 22/03/2018.

PROCEL. “**Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes**”. 2000. Disponível em <
<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID6C524BD8642240ECAD7DEF8CD7A8C0D9PTBRIE.htm>>. Acesso em 25/03/2018.

PROCEL. “**Iluminação Pública**”. 2000. Disponível em <
<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BCC4A0FEF-A8D7-41C0-BC18-66507F3192F8%7D&Team=%C2%B6ms=itemID=%257%E2%80%8BBD72C274C-52A8-4CED-B954-02556F4BC6AF%7D>>. Acesso em 27/03/2018.

RELUZ, Procel. “**Descarte de Lâmpadas de Iluminação Pública**”. 2004. Disponível em <
<http://www.procelinfo.com.br/services/procel-info/Simuladores/DownloadSimulator.asp?DocumentID=%7B20715DAF%2D79EE%2D46C3%2D9CD1%2D428C9E06A659%7D&ServiceInstUID=%7B5E202C83%2DF05D%2D4280%2D9004%2D3D59B20BEA4F%7D>>. Acesso em 02/04/2018.

ANEEL. “**Capacidade de Geração do Brasil**”. 2018. Disponível em <
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 09/03/2018.

ENERGIA, MINISTÉRIO DE MINAS E. “**Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**”. 2017. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso 17/03/2018.

ENERGIA, MINISTÉRIO DE MINAS E. “**Energia Solar no Brasil e Mundo**”. 2016. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>>. Acesso 20/03/2018.

ENERGÉTICA, EMPRESA DE PESQUISA. “**Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**”. 2012. Disponível em <http://antigo.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso 22/03/2018.

ESTATÍSTICA, Instituto Brasileiro de Geografia e. “**Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílios: Tabela 1959 - Domicílios particulares permanentes e Moradores em domicílios particulares permanentes, por classes de rendimento mensal domiciliar, situação do domicílio e iluminação elétrica**”. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=pnad&o=3&i=P&c=1959#nota>>. Acesso 27/03/2018.

FONSECA, Coracy da Silva. “**Implantação de Sistemas Fotovoltaicos em Comunidades Remotas no Estado do Amapá: A Política Pública, Desafios e Possibilidade**”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 03, 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016. Disponível em: <<http://www.abens.org.br/CBENS2016/anais/anais/index.htm>>. Acesso 12/04/2018.

VILLALVA, Marcelo Gradella. “**Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**”. 2. ed. São Paulo: Editora Érica. 2015.

ELÉTRICA, Agência Nacional de Energia. “**Resolução Normativa nº 482**”. 2012. Disponível em < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> >. Acesso 28/04/2018.

PROCEL. “**Uberlândia começa o processo de mudanças na iluminação pública**”. 2018. Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID={F5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65}¶ms=itemID={8833EF58-8ACF-4D32-AB35-245039F4EC83};&UIPartUID={D90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898}>>. Acesso 02/05/2018.

CEMIG. “**Atlas Solarimétrico de Minas Gerais – Volume II**”. Belo Horizonte: Editora Futura Express. 2016. Disponível em <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/atlas_solarimetrico.pdf>. Acesso 07/05/2018.

LUMICENTER. “**Catálogo de Produtos: LEX01-S**”. 2018. Disponível em < <http://www.lumicenteriluminacao.com.br/catalogo/lex01-s-p3443/>>. Acesso 13/05/2018.

ABNT. “**Norma Brasileira ABNT NBR 5101 Iluminação Pública: Procedimento**”. Rio de Janeiro. 2012.

DIAL. **Software DIALux**. Disponível em < <https://www.dial.de/en/dialux/> > Acesso 02/03/2018.

PROCEL, Eletrobrás. “**Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**”. 3ª Edição. Itajubá. Universidade Federal de Itajubá. 2006.

SOLAR, Minha casa. “**Painel Solar 330W Canadian Solar - CS6U-330P**”. 2018. Disponível em < <https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-330w-canadian-solar-cs6u-330p-79230> > Acesso 16/03/2018.

SOLAR, Minha casa. “**Microinversor Grid-Tie 0.5kW sem WI-FI APSystems - YC500-127V**”. 2018. Disponível em <
https://www.minhacasasolar.com.br/produto/microinversor-grid-tie-0-5kw-sem-wi-fi-apsystems-yc500-127v-79195?utm_source=GoogleShopping&utm_medium=&utm_campaign=GoogleShopping&gclid=CjwKCAjwsJ3ZBRBJEiwAtuvtIJEI-hjBZacuNUaetHudkeA-Uy0etizkFLclYsAqbYeEPcwZKYHhfxoC0S0QAvD_BwE> Acesso 16/03/2018.

CEMIG. “**Valores de Tarifas e Serviços**”. 2018. Disponível em
<http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>. Acesso 15/06/2018.

BRASIL, Banco Central do. “**Taxa SELIC: Dados diários**”. 2018. Disponível em <
<http://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdiarios.asp> >. Acesso 16/06/2018.

ANEXO I



MAXPOWER CS6U-325 | 330 | 335 | 340P

Canadian Solar's modules use the latest innovative cell technology, increasing module power output and system reliability, ensured by 15 years of experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.

KEY FEATURES

-  Excellent module efficiency of up to: 17.49 %
-  Outstanding low irradiance performance of up to: 96.0 %
-  High PTC rating of up to: 92.21 %
-  IP68 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 2400 Pa

25
years
linear power output warranty

10
years
product warranty on materials and workmanship

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2008 / Quality management system
ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / CQC / MCS / INMETRO / CEC AU
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1
IEC 60068-2-68: SGS
Take-e-way



* Please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific product certificates applicable in your market.

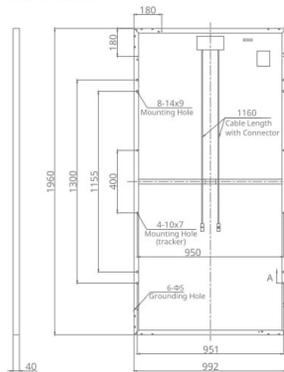
CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 21 GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

CANADIAN SOLAR INC.

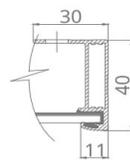
545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)

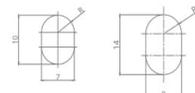
Rear View



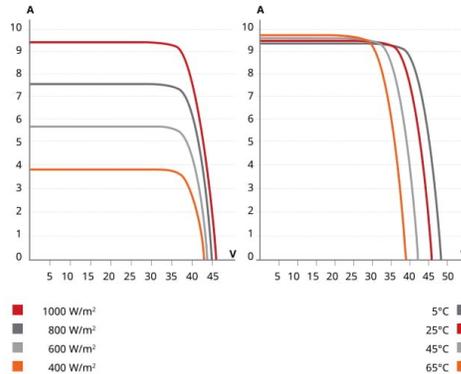
Frame Cross Section A-A



Mounting Hole



CS6U-330P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6U	325P	330P	335P	340P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.0 V	37.2 V	37.4 V	37.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.78 A	8.88 A	8.96 A	9.05 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.5 V	45.6 V	45.8 V	45.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.34 A	9.45 A	9.54 A	9.62 A
Module Efficiency	16.72%	16.97%	17.23%	17.49%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6U	325P	330P	335P	340P
Nominal Max. Power (Pmax)	239 W	242 W	246 W	250 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	34.0 V	34.2 V	34.4 V	34.6 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.01 A	7.08 A	7.15 A	7.22 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.4 V	42.5 V	42.6 V	42.7 V
Short Circuit Current (Isc)	7.54 A	7.63 A	7.70 A	7.77 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6×12)
Dimensions	1960 × 992 × 40 mm (77.2 × 39.1 × 1.57 in)
Weight	22.4 kg (49.4 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL), 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	26 pieces, 635 kg (1400 lbs)
Per Container (40' HQ)	624 pieces

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	43 ± 2 °C

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Outstanding performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 96.0 % for irradiances between 200 W/m² and 1000 W/m² (AM 1.5, 25°C).

The aforesaid datasheet only provides the general information on Canadian Solar products and, due to the on-going innovation and improvement, please always contact your local Canadian Solar sales representative for the updated information on specifications, key features and certification requirements of Canadian Solar products in your region.

Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

PARTNER SECTION



ANEXO II



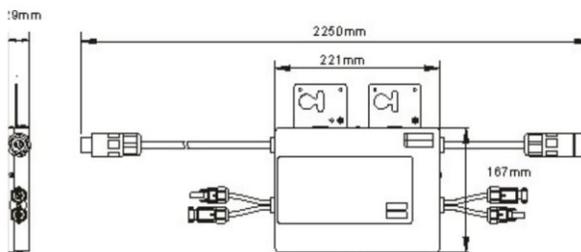
Liderando a Indústria na
Tecnologia de Microinversor



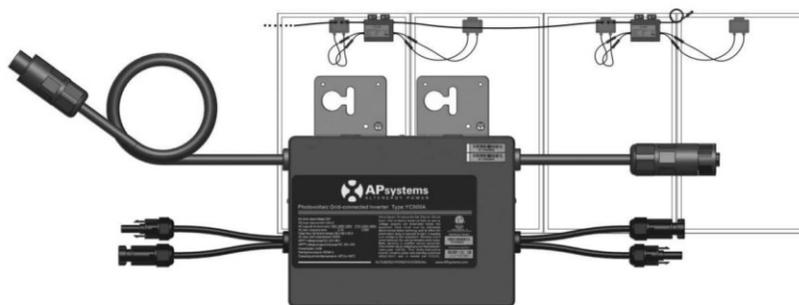
Microinversor YC500A

- Uma unidade conecta a dois módulos FV
- MPPT individual para cada módulo FV
- Potência máxima de saída: 500W
- Dispositivo de desconexão automática integrado.

DIMENSÕES



Nosso principal produto, o APsystems YC500A é um microinversor conectado à rede com sistemas de rede e monitoramento inteligente para garantir a máxima eficiência. Altamente confiável e com custo-benefício, o YC500A oferece 250W AC por módulo com duplo MPPT. Metade dos inversores e metade da instalação significa real economia de custos para os clientes residenciais e comerciais.



(Para o Brasil)

Datasheet do Microinversor APsystems YC500A

Modelo	Brazil	
Regional	YC500A-BR	YC500A-127-BR
Dados de Entrada (CC)		
Faixa de tensão de MPPT	22V-45V	
Faixa de tensão de Operação	16V-52V	
Máxima tensão de entrada	55V	
Tensão de ligamento	22V	
Máxima corrente de entrada	12A x 2	
Dados de Saída (AC)		
Potência de saída Nominal CA	500W	
Tensão de saída Nominal	220V	127V
Corrente de Saída Nominal	2.27A	3.94V
Faixa de Tensão de Saída Padrão	176V-242V*	101.6V-139.7V*
Faixa de Tensão de Saída Extendida	150V-298V	82V-155V
Saída de Frequência Nominal	60Hz	
Faixa de Frequência de Saída Padrão	57.5Hz-62Hz*	
Faixa de Frequência de Saída Extendida	55.1Hz -64.9Hz	
Fator de Potência	>0.99	
Distorção Harmônica Total	<3%	
Eficiência		
Eficiência Pico	95.5%	95%
Consumo de Energia à Noite	120mW	
Dados Mecânicos		
Faixa de Temperatura Ambiente de Operação	-40°C to +65°C	
Faixa de Temperatura de Armazenamento	-40°C to +85°C	
Dimensões (Lar x Alt x Esp)	221mm x 167mm x 29mm	
Peso	2.5kg	
Cabo CA	25A	
Classificação	IP67	
Resfriamento	Ventilação natural – Sem ventiladores	
Características & Conformidade		
Comunicação (Inversor ao ECU)	Comunicação pela Rede	
Monitoramento	Através do software EMA	
Design do Transformador	Transformadores de Alta Frequência, Isolado Galvanicamente	
Conformidade	ABNT NBR 16149:2013, ABNT NBR 16150:2013 and ABNT NBR IEC 62116: 2012	
Desconexão Automática	Dispositivo de Auto-desconexão Integrado	

* Programável através do ECU para atender às necessidades do cliente.

© All Rights Reserved

Especificações sujeitas a alterações sem aviso prévio - por favor, garantir que você está usando a atualização mais recente encontrada em www.APsistemas.com

600 Ericksen Ave NE, Suite 200 Seattle, WA 98110 | 844.666.7035 | APsystems.com

2016/8/27 Rev2.0 1

ANEXO III

Rodovia

08/02/2018

DIALux

Rua 1: Alternativa 1 / Pista de rodagem 2 (M2) / Isolines

Pista de rodagem 2 (M2)

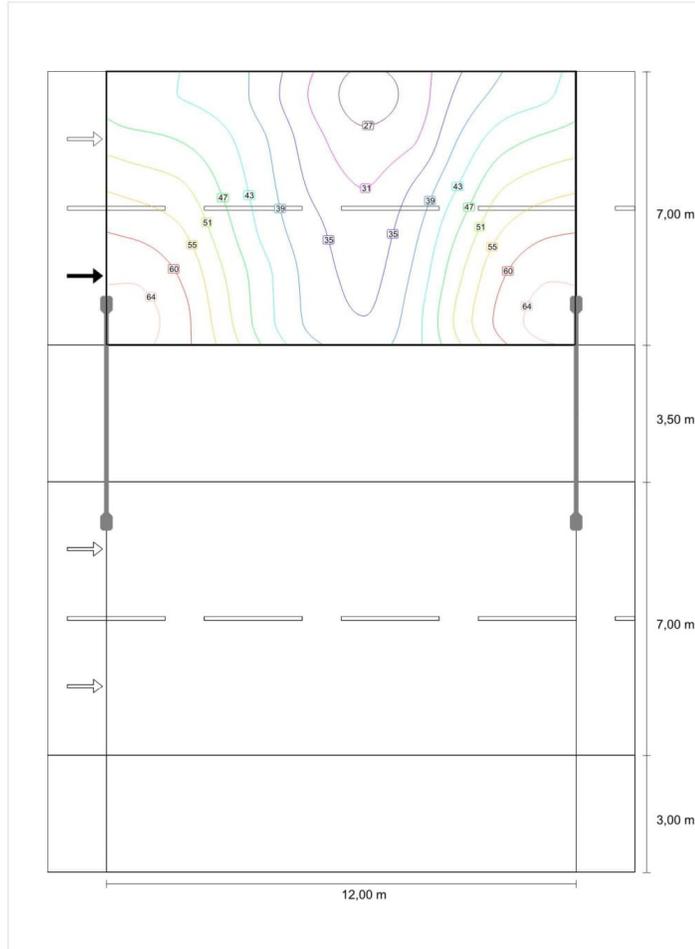
Maintenance factor: 0.67

Grid: 10 x 6 Points

Lm [cd/m ²]	Uo	UI	EIR	TI [%]
≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≥ 0.35	
✓ 1.54	✓ 0.59	✗ 0.67	✓ 0.73	* 2

* Informative, not part of the valuation

Horizontal illuminance



Scale: 1 : 75

ANEXO IV

Rodovia

08/02/2018

DIALux

Rua 1: Alternativa 1 / Pista de rodagem 2 (M2) / Table

Pista de rodagem 2 (M2)

Horizontal illuminance [lx]

19.917	43.8	43.3	41.7	36.4	30.0	25.1	28.4	36.0	40.8	43.2
18.750	48.8	47.4	44.2	38.9	32.1	28.3	30.5	39.4	45.9	48.5
17.583	54.0	52.2	46.6	40.0	34.0	31.1	35.2	43.3	51.3	53.9
16.417	58.8	56.2	49.0	41.2	36.0	32.7	37.9	47.4	55.8	58.9
15.250	63.1	59.7	51.6	43.6	37.0	34.0	39.6	50.6	59.5	63.2
14.083	65.6	61.6	53.1	44.0	37.8	35.5	41.2	52.5	61.3	65.5
m	0.600	1.800	3.000	4.200	5.400	6.600	7.800	9.000	10.200	11.400

Grid: 10 x 6 Points

Em [lx]	Emin [lx]	Emax [lx]	g1	g2
45.1	25.1	65.6	0.557	0.383

ANEXO V

Rodovia

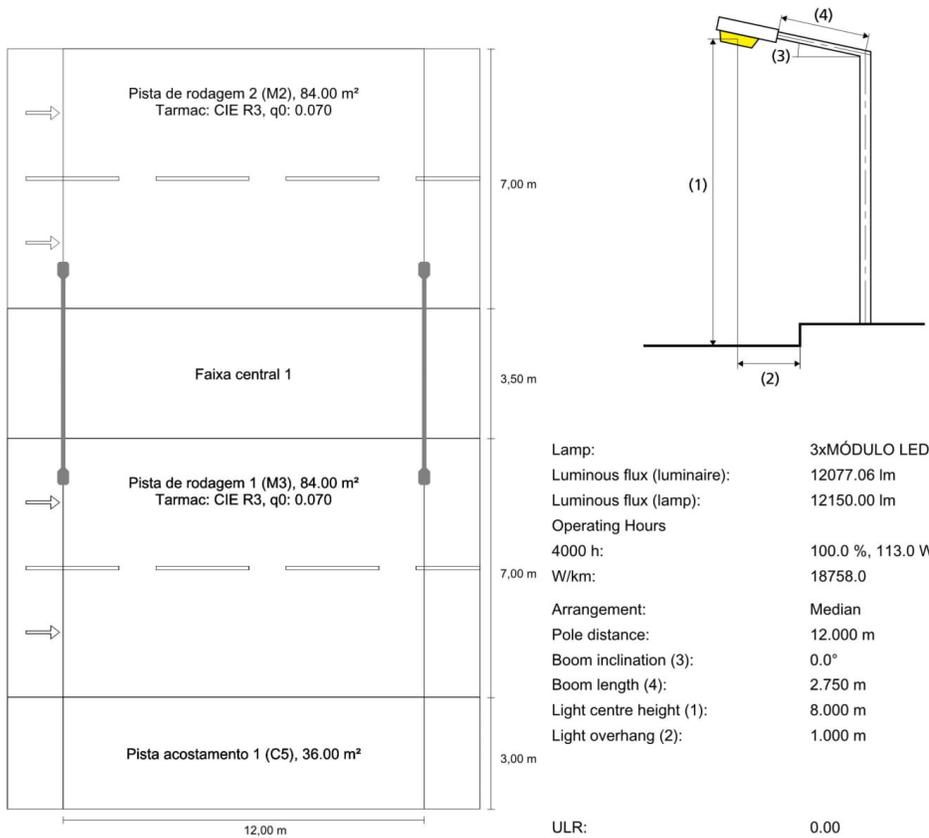
08/02/2018

DIALux

Rua 1: Alternativa 1 / Planning results

Rua 1 according to EN 13201:2015

LUMICENTER LEX01-S3M750



ULR: 0.00
 ULOR: 0.00

Maximum luminous intensities
 at 70°: 643 cd/klm
 at 80°: 13.4 cd/klm
 at 90°: 1.01 cd/klm
 Luminous intensity class: G*3

Any direction forming the specified angle from the downward vertical, with the luminaire installed for use.

Arrangement complies with glare index class D.6

Results for valuation fields

Maintenance factor: 0.67

Pista de rodagem 2 (M2)

Lm [cd/m²]	Uo	Uj	EIR	TI [%]
≥ 1.50	≥ 0.40	≥ 0.70	≥ 0.35	
✓ 1.54	✓ 0.59	✗ 0.67	✓ 0.73	* 2

Pista de rodagem 1 (M3)

Lm [cd/m²]	Uo	Uj	TI [%]	EIR
≥ 1.00	≥ 0.40	≥ 0.60	≤ 15	≥ 0.30
✓ 1.61	✓ 0.59	✓ 0.69	✓ 2	✓ 0.73

Pista acostamento 1 (C5)

Em [lx]	Uo
≥ 7.50	≥ 0.40
✓ 30.46	✓ 0.70

* Informative, not part of the valuation

Results for energy efficiency indicators

Power density indicator (Dp)	0.026 W/lxm ²
Energy consumption density	
Arrangement: LEX01-S3M750 (904.0 kWh/yr)	4.4 kWh/m ² yr

