

ANA CAROLINA ROCHA DE AQUINO

Avião elétrico: energia renovável fotovoltaica x combustível aeronáutico

Ana Carolina Rocha de Aquino

Avião elétrico: energia renovável fotovoltaica x combustível aeronáutico

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dr^a. Thaís Santos Castro

Guaratinguetá
2018

A657a	Aquino, Ana Carolina Rocha de Avião elétrico: energia renovável fotovoltaica x combustível aeronáutico / Ana Carolina Rocha de Aquino – Guaratinguetá, 2018. 44 f : il. Bibliografia: f. 42-44 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Thaís Santos Castro 1. Aeronaves. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Energia – fontes alternativas. I. Título. CDU 620.91
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

ANA CAROLINA ROCHA DE AQUINO

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

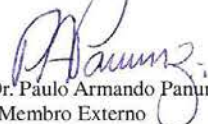
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Thais Santos Castro
Orientadora/UNESP-FEG


Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
UNESP-FEG


Prof. Dr. Paulo Armando Panunzio
Membro Externo

Dezembro 2018

De modo especial a minha mãe Sheila pelo amor incondicional e pelo incentivo para que eu concluísse este curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de estar vivendo todas essas experiências e por todo aprendizado ao longo desses anos, por me iluminar e me guiar sempre diante de todas as adversidades por ser meu refúgio e fortaleza em todos os momentos.

Agradeço a minha mãe Sheila pelo amor incondicional por estar, e se fazer presente em todos os momentos, por toda liberdade e confiança, por permitir e me incentivar viver esse sonho. Por sorrir e chorar ao meu lado a cada conquista.

Ao meu pai Dirceu que pode estar presente e empenhar energia e tempo para todas as minhas mudanças e por toda ajuda. Por me mostrar o quão forte eu poderia ser.

As minhas avós Ines e Isaura por todas as orações, todo carinho e cuidado. A minha tia Shirley que em muitos momentos foi como minha mãe sempre com muito carinho e atenção me acolheu.

As minhas amigas/irmãs Aurea e Tainã, que sempre estiveram dispostas a me ouvir e dar conselhos me fazendo sorrir. Sendo abrigo em todos os momentos. Aos amigos de Guará Kerolene, Camila, Milena, Paloma, Rosane, Ana Elidia, Paula e Cyro pela companhia e pelas conversas.

Agradeço também a Daniela Rodrigues pessoa responsável em manter minha saúde mental, agradeço a Deus por ter colocado você em minha vida, por me ajudar a organizar e me fazer aceitar muitas questões na minha cabeça, e ainda pela capacidade de me fazer sorrir diante as dificuldades.

Agradeço a minha Orientadora Profa. Thaís e ao Prof. Teófilo por toda atenção e dedicação nesses meses de trabalho, por todos os conselhos e orientações.

Por fim a Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá que me proporcionou um conhecimento muito além do que eu imaginava e pelo privilégio de fazer parte de uma formação com excelência e renome.

“Se fiz descobertas valiosas, foi mais por ter paciência do que qualquer outro talento.”

Isaac Newton

“Deus nos concede, a cada dia, uma página de vida nova no livro do tempo. Aquilo que colocarmos nela, corre por nossa conta.”

Chico Xavier

RESUMO

O presente trabalho, motivado pelo tema energia renovável, é alvo de discussões em virtude do aumento crescente do consumo de combustível fóssil, bem como todos os fatores ambientais envolvidos nessa questão. E a partir de aeronaves de propulsão elétrica, já existentes no mercado, tem como proposta o dimensionamento de uma usina fotovoltaica para geração de energia elétrica para carregamento dessas aeronaves, bem como análise técnica econômica de viabilidade da implantação dessa usina e posteriormente comparação de custos de consumo com uma aeronave a combustão. A princípio realizou-se uma revisão bibliográfica com objetivo de conhecer a respeito das aeronaves elétricas, índices de radiação solar, tecnologia dos painéis fotovoltaicos, funcionamento das aeronaves, baterias, sistemas fotovoltaicos conectados a rede e sistemas independentes. Continuando a segunda etapa do trabalho, realizou-se um levantamento de dados sobre a energia fotovoltaica e a aeronave com propulsão elétrica, bem como as especificações do avião elétrico em estudo e dos painéis fotovoltaicos que serão utilizados para o suprimento de energia elétrica das baterias.

Com os dados foi possível dimensionar a usina necessária para suprir uma esquadrilha de 5 aviões, utilizando um, três e cinco dias. Após esse dimensionamento uma análise econômica foi realizada para se determinar a viabilidade de implantação dessa usina. Posteriormente realizou a comparação do consumo entre um avião elétrico e um avião a combustão. Os resultados obtidos corresponderam aos objetivos iniciais de viabilidade econômica de implantação de usina fotovoltaica para geração de energia elétrica, para carregamento dessas aeronaves assim como sua viabilidade de custo no consumo comparada com a aeronave de combustão.

PALAVRAS-CHAVE: Avião elétrico. Fotovoltaico. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

The present work has as main theme the renewable energy. And from an electric power propulsion mechanism to the installation of electric power to the installation of electric power to the installation of a power plant electric power combustion aircraft. At the outset, a bibliography with the knowledge of solar rays, solar radiation indexes, existing technology on photovoltaic panels, the operation of aircraft and photovoltaic systems. Batteries, photovoltaic systems connect a network and independent systems. At this stage of the work, a general knowledge of the subject was sought. Following data were purchased from commercially available manufacturers, panel contact, SUN FLYER aircraft manufacturer technical data. With the detailed data it was possible to size a plant needed to supply a fleet of 5 airplanes, with variations of days of use of these planes. Using 1 day, 3 and 5 days. After this design, an economic analysis was carried out with the determination of a feasibility of plant implantation. Subsequently a final analysis was performed comparing the consumption of an electric airplane x airplane combustion. The results obtained corresponded to the initial economic feasibility of implementing a photovoltaic power plant to generate electric energy for the loading of these aircraft as well as their feasibility of cost in the consumption compared to the combustion aircraft.

KEYWORDS: Electric plane. Photovoltaic. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de propulsão de aeronaves convencional (MCI).....	15
Figura 2 - Aeronave de propulsão elétrica.....	16
Figura 3 - Potencial de geração solar fotovoltaica.....	18
Figura 4 - Composição de um painel fotovoltaico.....	20
Figura 5 - Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo.....	21
Figura 6 - Distribuição da produção mundial de células fotovoltaicas.....	22
Figura 7 - Aeronave Sun Flyer 2.....	26
Figura 8 – Cockpit Sun Flyer 2.....	26
Figura 9 - Painel fotovoltaico 245Wp – Yingli Energy.....	27
Figura 10 - Associação dos painéis fotovoltaicos em série e paralelo.....	30
Figura 11 - Média anual de radiação solar global.....	32
Figura 12 - Custo da eletricidade gerada pelo SFCR com subsídio 10%.....	36
Figura 13 - Custo da eletricidade gerada pelo SFCR com subsídio 50%.....	37
Figura 14 - Aeronaves MCI (Cessna 172) x elétrico (Sun Flyer).....	39
Figura 15 - Comparação de custos entre os aviões Sun Flyer e Cessna.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados técnicos de catálogos de baterias recarregáveis comercialmente disponíveis.....	23
Tabela 2 - Informações técnicas do painel Yingli Energy YL245P-29b.....	28
Tabela 3 - Especificações aeronave Sun Flyer 2.....	32
Tabela 4 - Custos para o sistema fotovoltaico – ano 2018.....	33
Tabela 5 - Dimensionamento da usina fotovoltaica.....	35
Tabela 6 - Dados técnicos da aeronave MCI e elétrica.....	38
Tabela 7 - Comparativo entre custo operacional Sun Flyer 2 com Cessna 172.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	Erro! Indicador não definido.
1.1	PROPOSTA DO TRABALHO	12
1.2	MOTIVAÇÃO	12
1.3	OBJETIVO GERAL	13
1.3.1	Objetivos específicos.....	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	15
2.1	MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA A PROPULSÃO DE AERONAVES.....	15
2.2	AVIÃO ELÉTRICO.....	15
2.3	ENERGIA SOLAR.....	16
2.4	POTENCIAL ENERGIA SOLAR NO BRASIL	18
2.5	CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	19
2.6	BATERIAS.....	23
2.6.1	Baterias li-íon.....	25
2.7	INVERSORES.....	25
2.8	O AVIÃO ELÉTRICO	26
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA	28
3.1.1	O painel fotovoltaico.....	28
3.1.2	Dimensionamento do sistema de fornecimento de energia com o painel fotovoltaico	28
3.1.3	Inversor	311
3.2	AVIÃO ELÉTRICO E SUAS ESPECIFICAÇÕES	31
3.2.1	Aeronave com 2 assentos e potência do motor de 90 kW.....	31
3.3	IRRADIAÇÃO SOLAR	32
3.4	ANÁLISE ECONOMICA	33
4	RESULTADOS	35
4.1	RESULTADO PARA DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA	36
4.2	RESULTADO PARA ANÁLISE ECONOMICA.....	36

4.3	CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE ECONÔMICA ENTRE O AVIÃO COM PROPULSÃO ELÉTRICA E O COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	37
4.3.1	Resultado da análise de comparação de custos entre o avião com propulsão elétrica e o avião com motor a combustão interna.....	40
5	CONCLUSÕES.....	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROPOSTA DO TRABALHO

O trabalho apresenta o estudo do fornecimento de eletricidade para suprir as baterias de um avião com propulsão elétrica. O avião escolhido para estudo é da fabricante Sun Flyer. A forma de obtenção da energia renovável para o carregamento das aeronaves foi utilizando um conjunto de painéis fotovoltaicos.

Para o início do trabalho avaliou-se periódicos de caráter científico recentes e informações de órgãos regulamentadores de fornecimento de energia.

Os aspectos técnicos das aeronaves e dos painéis fotovoltaicos fornecidos pelo fabricante, foram levantados para comparação da autonomia do avião. Utilizando-se de cálculos e análise econômica foi possível parametrizar algumas situações para carregamento do avião elétrico.

1.2 MOTIVAÇÃO

O tema energia renovável tem se tornado cada vez mais alvo de discussões pelo mundo. Os combustíveis fósseis ainda dominam a cadeia da matriz energética global, faz-se necessário investimentos em outras fontes de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012, p.1). De acordo com o relatório anual World Energy Outlook (2012, p.8) da IEA (International Energy Agency), a procura mundial de energia continuará crescendo e mais investimentos no setor serão necessários. Entretanto, devido ao aumento do consumo energético e da exaustão dos recursos fósseis, se faz necessário o aumento da geração de energia elétrica através da utilização de fontes renováveis, como fontes hidráulicas, eólicas e solar. As fontes renováveis de energia são aquelas consideradas inesgotáveis para os padrões humanos de utilização e podem ser utilizadas continuamente e nunca se acabam, pois sempre se renovam (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Nessa monografia a fonte de energia renovável utilizada será a solar.

1.3 OBJETIVO GERAL

Tem-se como objetivo geral do trabalho a utilização de painéis fotovoltaicos como forma de transformar energia proveniente do sol em energia elétrica, dimensionando uma usina fotovoltaica para gerar eletricidade a qual será utilizada como fonte de energia para carregamento da aeronave de propulsão elétrica, Sun Flyer 2.

1.3.1 Objetivos específicos

Para análise e dimensionamento da usina fotovoltaica para carregamento das aeronaves incluem-se os seguintes objetivos específicos:

- Inicialmente uma revisão bibliográfica a respeito de aeronaves de combustão interna e aeronaves de propulsão elétrica;
- Estudar os efeitos de um painel fotovoltaico, buscar os dados necessários para dimensionar a usina fotovoltaica;
- Verificar todas as características técnicas das aeronaves em estudo bem como dos painéis fotovoltaicos comercialmente disponíveis;
- Dimensionar a usina fotovoltaica para gerar eletricidade suficiente para carregamento de cinco aeronaves;
- Analisar aspectos econômicos referentes ao payback de investimento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa monografia é composta de quatro capítulos.

O primeiro capítulo trata-se da introdução, dos objetivos geral e específicos da motivação do trabalho e da estrutura da monografia.

O segundo capítulo trata-se da revisão bibliográfica, levantamento de dados sobre a energia fotovoltaica e a aeronave com propulsão a motor elétrico, especificações do avião elétrico e dos painéis fotovoltaicos que serão utilizados para o suprimento de energia elétrica das baterias.

O terceiro capítulo trata-se do dimensionamento do sistema fotovoltaico para fornecimento de energia para as baterias do avião com propulsão elétrica. Também neste

capítulo será realizada uma análise técnica e econômica da utilização da aeronave com motor elétrico e suprimento de energia com painel fotovoltaico

O quarto capítulo apresenta os resultados da análise técnica e econômica.

O quinto capítulo apresenta as conclusões sobre o fornecimento de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico para carregamento das baterias de uma aeronave com motor de propulsão elétrica e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O uso recorrente de aeronaves vem aumentando rapidamente nas últimas décadas. Todos os anos é crescente o número de pessoas que viajam ao redor do mundo por aeronaves. O que leva a um crescente aumento no consumo de combustível de aviação, pesquisas mostram que 3% do total de consumo de combustíveis fósseis corresponde ao consumo de gasolina de aviação, sendo assim, se responsabilizando por 3% do total de emissões de CO₂ (BAHAROUZU, SOYKAN, OZERDEM, 2017). Tem-se conhecimento também que o esgotamento dos combustíveis fósseis é inevitável nas próximas décadas. Há uma necessidade não só em investimentos de aeronaves mais eficientes em termos de combustível, mas modernização das já existentes devem ser realizada. Além dos altos preços dos combustíveis, cresce também a preocupação com meio ambiente, com isso tem-se avaliado diferentes conceitos de aeronaves (BAHAROUZU, SOYKAN, OZERDEM, 2017).

2.1 MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA A PROPULSÃO DE AERONAVES

Segundo Homa (2010), o motor de combustão interna é uma máquina térmica que transforma a energia calorífica da queima do combustível em energia mecânica. Essa energia obtida é utilizada para fornecer a tração necessária ao voo.

O motor a pistão aproveita a energia da expansão dos gases gerados pela queima da mistura ar-combustível no seu interior para impulsionar um pistão. Esse movimento é transformado em rotação, por meio de uma biela, acoplada a um eixo de manivelas. Nesse caso, a mistura tem de ocupar todo o espaço em que está contida e no momento da explosão, provoca uma elevação de temperatura e de pressão, simultaneamente, sobre todo o espaço confinante. Cada vez que ocorre a combustão, o pistão é impulsionado pela expansão dos gases. O funcionamento do motor é consequência da sucessão de impulsos sobre o pistão, chamados de ciclos termodinâmicos (HOMA, 2010; KLOTZEL, 2015).

O motor de combustão interna tem muitas peças móveis, como o virabrequim, as hastes dos comandos de válvulas dos cilindros, as engrenagens e os comes. Necessitam de constante lubrificação e substituição de óleos lubrificantes, além dos combustíveis (KLOTZEL, 2015).

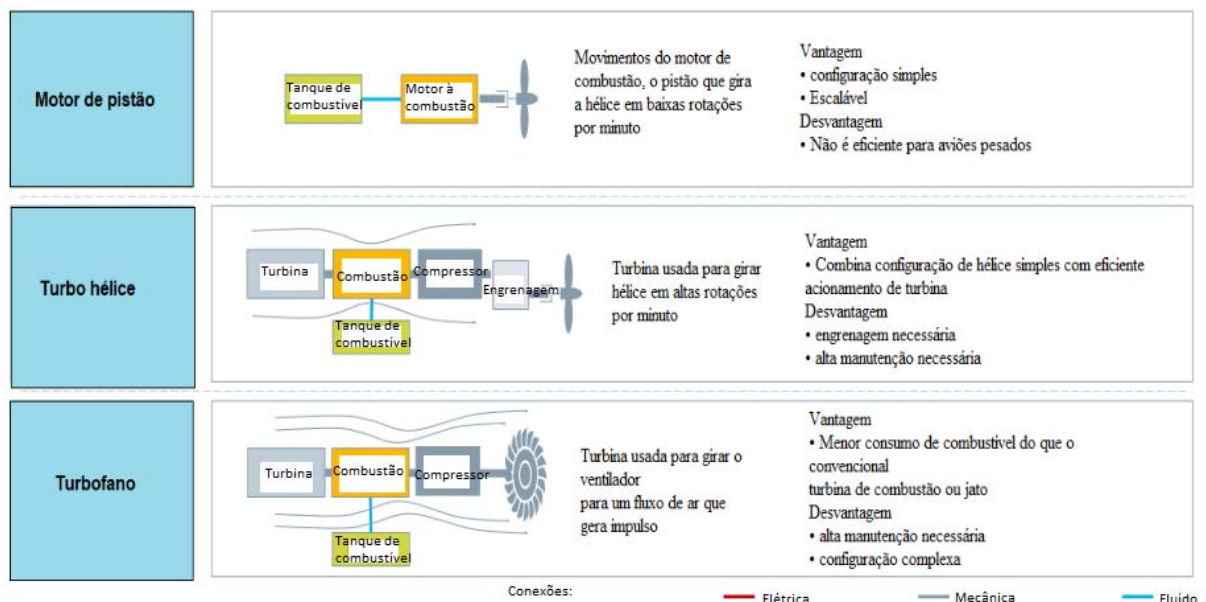
No funcionamento de motores de combustão interna com ignição por faísca, são utilizados derivados de petróleo (gasolina ou diesel) ou derivados de vegetais (etanol) como combustível.

O fornecimento da mistura ar/combustível para o motor está a cargo do sistema de alimentação que filtra e aquece o ar, aumenta a pressão do ar admitido nos casos de motor superalimentado e mistura o combustível com o ar, por carburação ou por injeção.

Os motores baseados no Ciclo de Otto, idealizado por Beaud Rochas e desenvolvido com sucesso em 1876, pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto, equipam a maioria das aeronaves de pequeno porte atualmente.

A Figura 1 mostra três tipos de propulsão de aeronaves convencional a combustão, apresentando o esquema de conexões elétricas, mecânicas e de fluidos existentes.

Figura 1 - Tipos de propulsão de aeronaves convencional (MCI)



Fonte: Adaptado de Siemens e Aircraft - Disrupting Aircraft Propulsion (2018).

2.2 AVIÃO ELÉTRICO

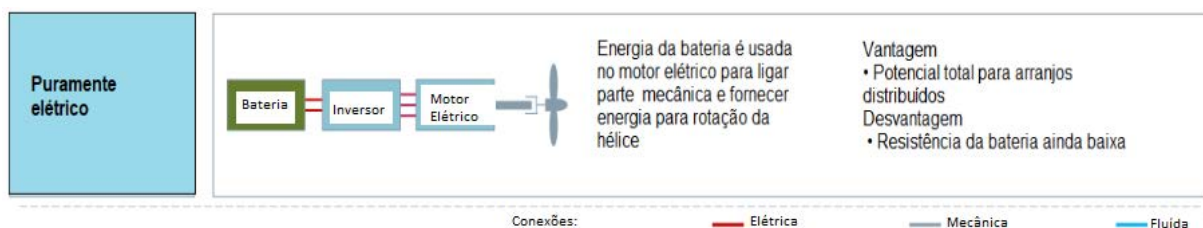
Para o avião a propulsão com motor elétrico, nota-se que há somente o eixo como parte móvel do motor. Os combustíveis são substituídos por um conjunto de baterias que são responsáveis por fornecer a energia para o acionamento do motor. As posições das hélices são as mesmas. A energia para suprir e carregar as baterias pode ser fornecida pela energia da rede convencional, por uma usina fotovoltaica, por meio de uma micro usina hidrelétrica ou por um gerador movido a energia eólica (BAHAROUZU, SOYKAN, OZERDEM, 2017).

Há grandes parcerias de empresas inovadoras formadas por membros altamente capacitados de experiência nas áreas de engenharia aeronáutica, empresas distribuidoras de energia elétrica, fabricantes de motores elétricos, baterias e equipamentos eletrônicos, para produzir uma aeronave leve tracionada com motor elétrico e com capacidade para quatro pessoas. Dentre essas empresas destaca-se a Bye Aerospace como líder mundial e inovadora de aeronaves solares elétricas. A empresa foi fundada em 2007 e está sediada perto de Denver, com foco em avanços em eficiência de energia e design (BYE AEROSPACE, 2018).

Os aviões a propulsão elétrica, disponíveis em 2018, e com certificações podem voar a uma velocidade de cruzeiro de 160 km/h e alcançar até 220 km/h. A propulsão elétrica é mais adequada em processos de decolagem e pouso, com maior torque e melhor controle de velocidade. Uma vez que não tem de levar combustível, conserva uma massa constante. Os aviões mencionados, no mercado atual são adequados às necessidades das escolas de aviação, com pouca pista para decolagem e pouso, pode ter uma razão de subida de 1.000 fpm e com a autonomia suficiente para uma hora de voo, além de 30 minutos de reserva de energia nas baterias. O custo de operação do avião é por assento disponível/km como indicador de eficiência empregado pelo setor de aviação. Há necessidade da redução dos custos de operações dos aviões utilizados nas escolas de aviação e aeroclubes com motores de combustão interna (SUNFLYER, 2018; KLOTZEL, 2015; SHAOHUA, 2017).

A Figura 2 mostra um esquema ilustrativo de aeronave propulsão puramente elétrica, apresentando as conexões elétricas e mecânicas existentes.

Figura 2 – Aeronave propulsão elétrica



Fonte: Adaptado de Siemens e Aircraft - Disrupting Aircraft Propulsion (2018).

2.3 ENERGIA SOLAR

O Sol é a principal estrela do nosso sistema solar, é essencial para a sobrevivência de todos os seres vivos no planeta Terra. Ele é uma fonte de energia inesgotável, e a energia

gerada por essa estrela é uma alternativa energética para humanidade. Sendo responsável por parte das fontes energéticas existentes.

A energia solar incidente sobre a superfície da terra é superior a 10.000 vezes a demanda bruta de energia atual da humanidade. É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, responsável pelo ciclo das águas, que possibilita o represamento de rios e a conseqüente geração de hidroelétrica, sendo esta a tecnologia responsável por mais de 90% da energia elétrica gerada no Brasil (GALDINO ET AL. 2009).

A partir da radiação solar tem a formação de biomassas através da decomposição vegetal e animal, que por sua vez são absorvidos para o interior da crosta terrestre formando os combustíveis fósseis. A energia solar é responsável pela fotossíntese, ligação química incubida pelo desenvolvimento das plantas, bem como diferentes vitaminas necessárias para sobrevivência dos seres humanos. Com isso, sabe-se que a maioria das fontes de energia está direta ou indiretamente ligadas a energia solar (GALDINO ET AL. 2009)

Buscando um aproveitamento direto da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, com destaque para a conversão fotovoltaica, a conversão térmica e a arquitetura bioclimática. Este trabalho tem atenção especial para conversão fotovoltaica que baseia-se na conversão direta de energia luminosa em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. A conversão térmica constitui-se no aproveitamento direto da energia térmica do sol, seja para utilização imediata (aquecimento de água, processos industriais), ou para a geração de eletricidade por meio de um processo termodinâmico (geração de vapor). A arquitetura bioclimática consiste em utilizar materiais e soluções nas áreas de construção nas edificações, com objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica para a iluminação e para o conforto térmico, podendo ser vista como uma forma de uso da energia solar (GALDINO ET AL. 2009).

2.4 POTENCIAL ENERGIA SOLAR NO BRASIL

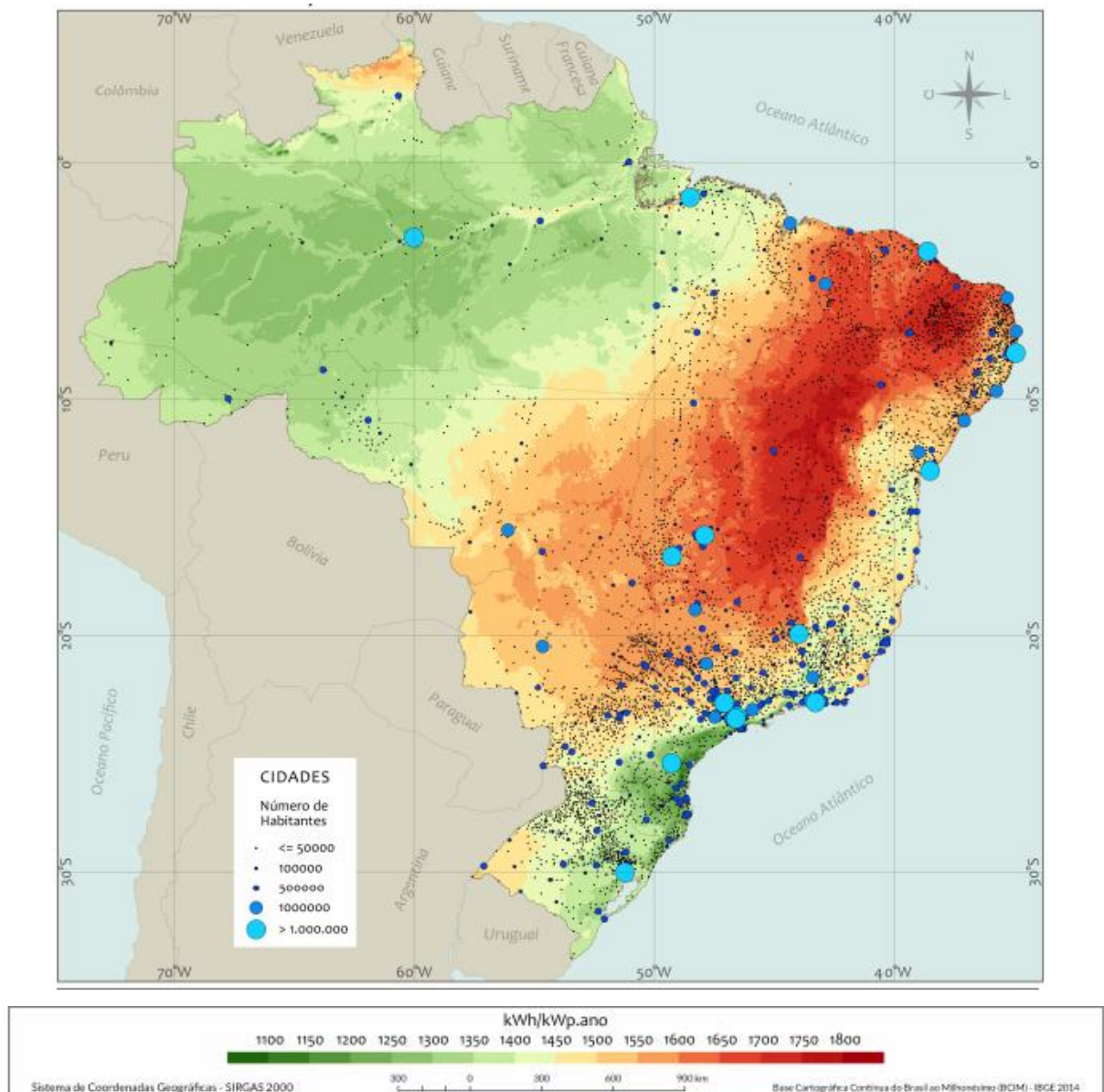
O Brasil está localizado em posição geográfica privilegiada quando se diz respeito ao potencial de energia solar. Está localizado em uma das áreas de maior recebimento de radiação solar do Planeta, a faixa intertropical com a área de maior incidência solar do globo terrestre.

A implementação de programas para utilização direta da energia solar já ocorre em algumas nações desenvolvidas, incluindo EUA, países da Europa e Japão, principalmente de sistemas fotovoltaicos. Nos países em desenvolvimento, com uma parcela significativa da

população vivendo na zona rural e ainda sem acesso à energia elétrica e a serviços sociais básicos, a energia solar é eficiente para suprir pequenas demandas em áreas isoladas no Brasil (GALDINO ET AL. 2009).

Como mostra a Figura 3, a média anual do potencial de geração fotovoltaica no Brasil representação visual do potencial energético solar do país considerando o número de habitantes por região.

Figura 3 - Potencial de geração solar fotovoltaica



Fonte: Pereira (2017).

2.5 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O funcionamento de um módulo está baseado no efeito fotovoltaico. Eles é formado por duas camadas de material semicondutor, uma com elétrons livres e outra com lacunas. Quando o material absorve a luz solar, os elétrons livres movem-se de uma camada condutora carregada negativamente, para a outra, de menor resistência, resultando em uma corrente elétrica (WALD, 2008-2009).

O material mais utilizado na fabricação de células solares é o silício. Sua preferência se deve a três fatores principais: não é tóxico, é o segundo elemento mais abundante na natureza (o primeiro é o oxigênio), e possui uma tecnologia consolidada devido à sua utilização predominante no ramo da microeletrônica (GORDON, 2001).

Porém, devido à falta de elétrons livres, o silício puro não é um bom condutor de elétrons, sendo necessário adição de materiais dopantes ou impurezas, costuma-se acrescentar, por processo de dopagem, certa porcentagem de fósforo e boro.

O incremento de fósforo e boro tem por objetivo criar camadas de elétrons livres positivas e negativas, respectivamente, formando a junção pn. Com esta junção os elétrons livres de silício tipo N tendem a preencher os vazios da estrutura de silício formando um campo elétrico. Quando a junção é excitada pela luz solar, os fótons da luz se chocam com os elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores (NIEDZIALKOSKI, 2013). Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles. E se houver um circuito elétrico entre ambos, surgirá uma corrente elétrica.

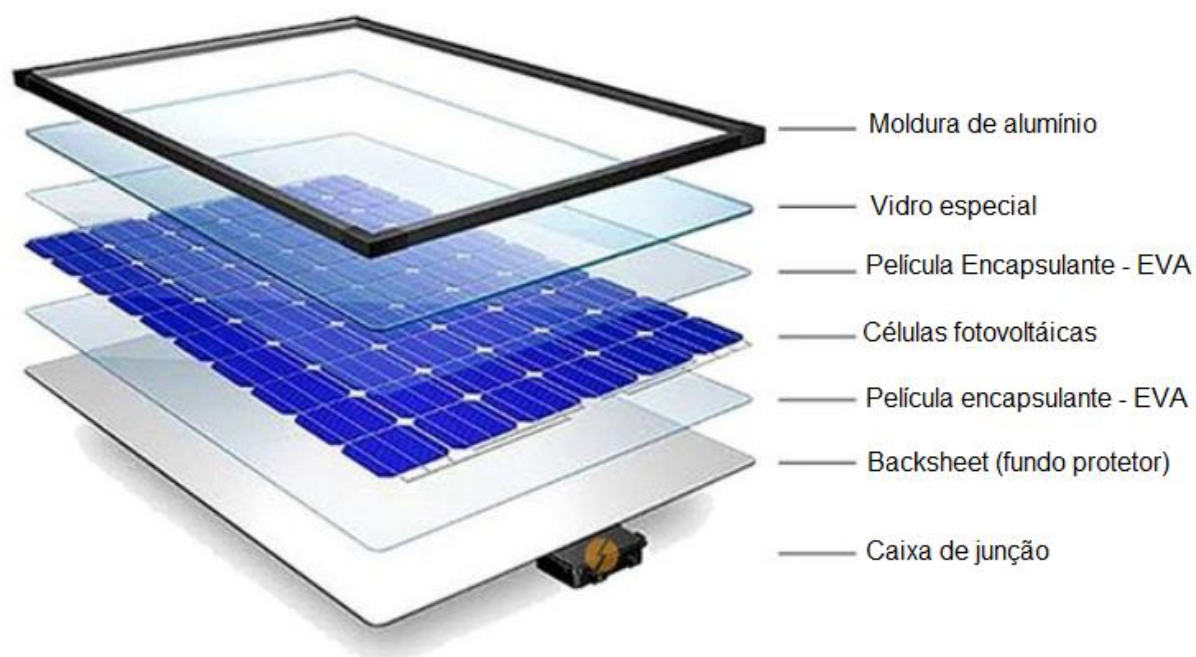
Existem atualmente duas principais tecnologias utilizadas para a fabricação de células fotovoltaicas no mercado: célula de silício cristalino e células de filmes finos. O objetivo maior das pesquisas é obter células que conciliem menor custo de fabricação, alta durabilidade e maior eficiência na conversão da radiação solar em energia elétrica.

Segundo CRESESB (2014), as células fotovoltaicas de silício cristalino, que pode ser mono ou policristalino, corresponderam em 2011 a 87,9% do mercado mundial, enquanto 12% da produção corresponderam a dispositivos fotovoltaicos de filmes finos.

Os módulos comercialmente denominados como filmes finos, podem ser de silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureno de cádmio (CdTe). Esse último tipo de módulo apresenta menor eficiência em relação aos primeiros citados (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 4 representa as partes e montagem de um painel fotovoltaico, as células são alocadas de forma que fiquem conectadas, em seguida são revestida por uma lamina de vidro temperado, emoldurado usando um quadro de alumínio.

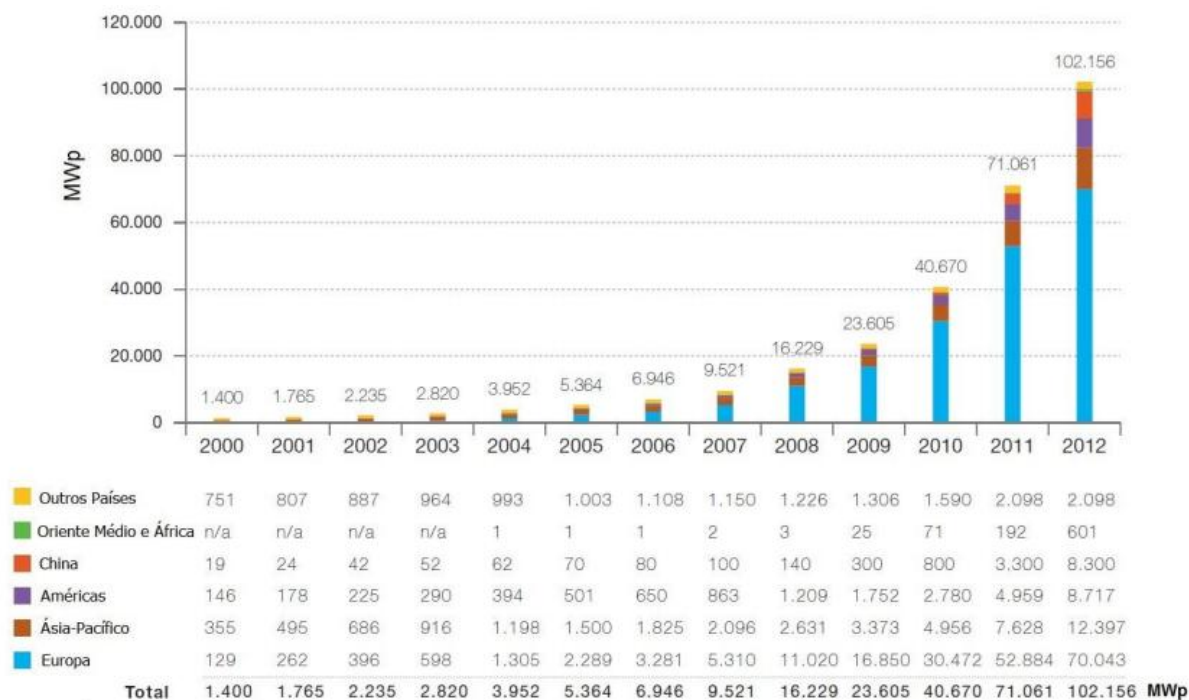
Figura 4 – Composição de um painel fotovoltaico



Fonte: Portal Solar (2018).

A Figura 5 mostra a evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo no período de 2000 a 2012, com destaque para Alemanha e Itália. Encontram-se instalados na Europa aproximadamente 74% da produção mundial de painéis fotovoltaicos. Na Itália cerca de 5% da energia consumida foi produzida por sistemas fotovoltaicos. Os maiores mercados fornecedores de sistemas fotovoltaicos estão no Japão e o no Estados Unidos. A potência global acumulada em 2012 superou 100 GWp, com destaque para a Alemanha com 32,3 GWp, e Itália com 16GWp.

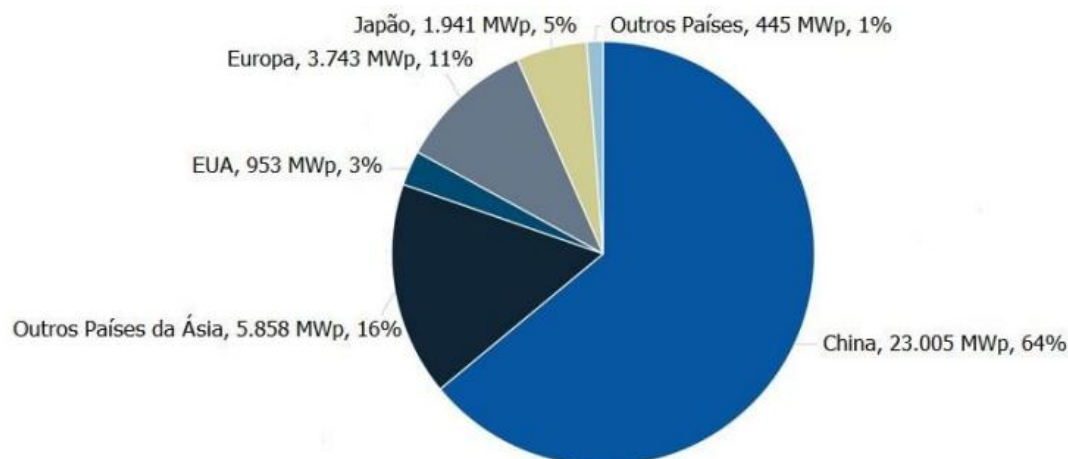
Figura 5 – Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo



Fonte: Pinho; Galdino (2014).

A China e a Índia apresentam grande crescimento devido a políticas públicas favoráveis, preços baixos de módulos fotovoltaicos com grandes investimentos para eletrificação rural. A China além de implementar o sistema fotovoltaico há altos investimentos governamentais para produção e exportação de células e módulos fotovoltaicos. A Figura 6 mostra o crescimento da produção mundial de painéis. A China fabricou 23 GWp em módulos fotovoltaicos, ficando com 64% da produção mundial. As indústrias asiáticas tem dominado o mercado, inclusive muitas indústrias européias e norte-americanas tem se instalado na Ásia, em busca de redução de custo, em função de mão de obra qualificada e barata, e a existência de cadeia produtiva estabelecida, bem como incentivos de agências financiadoras para implantação de fábrica (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 6 – Distribuição da produção mundial de células fotovoltaicas



Fonte: Pinho; Galdino (2014).

Além de um investimento governamental relativamente baixo, um dos grandes empecilhos para difusão dos painéis fotovoltaicos é seu elevado custo, porém essas questões vem se tornando cada vez menores quando comparadas aos impactos ambientais. No final de 2013, o custo do painel fotovoltaico de c-Si estava em torno de 0,60 €/Wp na Europa, 0,65 US\$/Wp nos EUA e menos de 3 R\$/Wp no Brasil (PINHO; GALDINO, 2014).

2.6 BATERIAS

Pode-se dizer que as baterias são conjuntos de células ou vasos eletroquímicos, conectados. Essas células são capazes de armazenar energia elétrica devido ao processo eletroquímico de oxidação que ocorre no interior das baterias. Quando essa bateria for conectada a uma carga elétrica ocorre o processo reverso, uma corrente contínua é produzida pela conversão de energia química em energia elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

Para o caso de um sistema fotovoltaico que não esteja conectado à rede, será necessário o dimensionamento do banco de baterias, fazendo com que o sistema esteja disponível para carregamento em qualquer hora do dia. A descarga de uma bateria é o processo de retirada de corrente elétrica, mediante o acoplamento de uma carga, por meio da conversão da energia química, no interior da célula (PINHO; GALDINO, 2014).

As baterias *deep cycle* tem a capacidade de descarregar completamente centenas de vezes e são projetadas para fornecer milhares de vezes uma quantidade rápida de energia durante a sua vida útil, enquanto que é capaz de descarregar completamente menos de 50

vezes. A aplicação está relacionada à importância da bateria em manter a integridade do sistema e a continuidade das operações (CASTRO, 2018)

Existem diversos tipos de baterias do tipo recarregáveis, onde a mais utilizada é a bateria de chumbo-ácido (Pb-ácido). Já existem tecnologias mais recentes como níquel-cádmio (NiCd), Níquel hidreto metálico (NiMH), íon de Lítio (Li-ion), embora apresentem vantagens em relação a chumbo-ácido, ainda são economicamente inviáveis para alguns sistemas (PINHO; GALDINO, 2014).

A Tabela 1 mostra alguns exemplos de baterias recarregáveis com composições químicas diferentes e suas características com densidade energética, eficiência, vida útil e número de ciclos.

Tabela 1 – Dados técnicos de catálogos de baterias recarregáveis comercialmente disponíveis

Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência η_{wh} [%]	Vida útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de operação		Aplicações típicas (exemplos)
							Carga padrão [°C]	Descarga [°C]	
Chumbo ácido ⁷ (Pb-ácido)	H ₂ SO ₄	20–40	50–120	80–90	3–20	250–500	–10 a +40	–15 a +50	Uso estacionário, tração, automotiva
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30–50	100–150	60–70	3–25	300–700	–20 a +50	–45 a +50	Mesmo tipo de aplicações das baterias chumbo-ácido, ferramentas, veículos elétricos
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	KOH	40–90	150–320	80–90	2–5	300–600	0 a +45	–20 a +60	Notebooks, celulares, câmeras fotográficas, veículos elétricos e híbridos, brinquedos
Íon de Lítio (Li-ion, Li-polímero)	Polímeros orgânicos	90–150	230–330	90–95	–	500–1000	0 a +40	–20 a +60	Notebooks, celulares, filmadoras, smart cards, veículos elétricos e híbridos
Bateria alcalina recarregável de Manganês (RAM) ⁸	KOH	70–100	200–300	75–90	–	20–50	–10 a +60	–20 a +50	Produtos de consumo, brinquedos
Cloreto de Níquel e Sódio (NaNiCl)	β'' -Al ₂ O ₃	~100	~150	80–90	–	~1000	+270 a +300	+270 a +300	Veículos elétricos e híbridos (possíveis aplicações estacionárias)

Fonte: Pinho; Galdino (2014).

As baterias para serem utilizadas em usinas fotovoltaicas são projetadas especificamente para ciclos diários de profundidade rasa a moderada, devem suportar descargas profundas e esporádicas devido aos dias em que não há geração de energia (PINHO; GALDINO, 2014).

Para sistemas fotovoltaicos isolados (SFI's) que tendem a operar por dias ou até semanas sem o completo recarregamento das baterias, devido a falta de energia solar. Essa

falta de recarregamento favorece a redução de tempo de vida útil da célula, principalmente para as baterias de chumbo ácido (PINHO; GALDINO, 2014).

Devido ao custo elevado das baterias e de suas peculiaridades de funcionamento e manutenção, nesse trabalho o dimensionamento da usina fotovoltaica será realizado apenas para sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR). Portanto não será necessário dimensionamento das baterias para a usina com geração fotovoltaica.

2.6.1 Baterias Li-íon

As baterias de Li-íon apresentam excelente performance sendo considerada uma tecnologia promissora, com altas densidades energéticas entre 80-150 Wh/kg. Com isso, tem sido utilizada em diversos equipamentos portáteis, também sendo empregada em veículos elétricos. Além de apresentar uma tensão nominal elevada, podendo atingir 3,5V, ela tem características de não possuir o chamado “efeito memória”, ou seja é capaz de suportar grandes taxas de carga e descarga aumentando o seu número de ciclos de vida útil (PINHO; GALDINO, 2014).

A aeronave Sun Flyer utilizada no estudo desse trabalho é suprida por baterias de Li-íon.

2.7 OS INVERSORES

Os inversores são dispositivos construídos com auxílio de semicondutores de potência, são formados por chaves eletrônicas que podem ser controladas, estas podem ser utilizadas como condutores ou bloqueadores por meio de um sinal de controle. Portanto os inversores podem ser capazes de transformar a energia elétrica de corrente contínua para corrente alternada. Essa corrente contínua (c.c), pode ser proveniente por exemplo de uma bateria, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão corrente alternada (c.a) de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas que serão alimentadas. Para o caso de sistemas conectados a rede elétrica de energia a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com tensão da rede (PINHO; GALDINO, 2014).

Há uma enorme quantidade de tipos diferentes de inversores devido as suas aplicações e peculiaridades. Muitas vezes fazem parte de equipamentos grandes, como no caso de UPS (*no-breaks*) e no acionamento eletrônico de motores de indução. Para os SFIs e SFCRs, apesar de ambos partilharem o mesmo princípio de funcionamento, os inversores apresentam

características específicas, com isso no caso dos SFIs são específicos para atender as exigências das concessionárias de distribuição de energia elétrica em termos de segurança e qualidade da energia que será injetada na rede.

Historicamente os inversores utilizados para sistemas fotovoltaicos eram apenas adaptações de circuitos existentes, os mais modernos são desenvolvidos com uma complexidade exigida de cada aplicação específica, utilizam chaves eletrônicas e seu desenvolvimento está correlacionado a evolução da eletrônica. Com isso, os custos de fabricação também foram reduzidos, e sua eficiência de conversão evoluiu chegando a valores próximos a 99% em inversores para serem aplicados SFCR (PINHO; GALDINO, 2014).

2.8 O AVIÃO ELÉTRICO

Nesse trabalho o estudo trata-se de um avião desenvolvido pela Bye Aerospace, líder em inovação de aeronaves elétricas solares, criou o programa para produzir o “Sun Flyer” de dois assentos a ser totalmente certificado sob o novo FAR 23 com intenção de disponibilizá-la para o mercado. Trata-se de uma empresa privada de capital fechado, que tem como sede uma cidade próxima a Denver, Colorado EUA (SUNFLYER, 2018).

O Sun Flyer Elétrico foi projetado para ser um tipo de treinador ideal com todas as vantagens e benefícios da propulsão elétrica. A empresa conta também com a aeronave de treinamento e pilotagem proprietária, a Sun Flyer 4 com 4 assentos (BYE AEROSPACE; SUNFLYER, 2018).

O Sun Flyer, é alimentado por um sistema de propulsão elétrica. É composto por seis baterias de íon de lítio que utilizam o sistema de propulsão elétrica, acionando diretamente a hélice fabricada com base de materiais compósitos. O desempenho do motor é regido por uma unidade de controle eletrônico que garante o uso ideal da energia armazenada nas baterias. O design elétrico apresenta menor arrasto em comparação com uma aeronave convencional e a área frontal do nariz é reduzida devido a um menor tamanho de motor e de resfriamento.

A aeronave é fabricada de material compósito, sendo o principal componente a fibra de carbono. O cockpit emprega um iPad para a exibição de instrumentação, incluindo sistemas de motor, bateria e aeronave. A aeronave se conecta ao sistema Redbird Flight Simulators Sidekick, que rastreia de modo sem fio, o motor da Sun Flyer, o tempo de voo, a localização física e a altitude em tempo real durante o voo (BYE AEROSPACE; SUNFLYER, 2018). A figura 7 apresenta a aeronave Sun Flyer 2, e a figura 8 o cockpit da aeronave Sun Flyer 2.

Figura 7 - Aeronave Sun Flyer 2



Fonte: Sun Flyer (2018)

Figura 8 - Cockpit Sun Flyer 2



Fonte: Business Insider (2016)

3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada para o dimensionamento de uma usina fotovoltaica *on-grid*, ou seja, a usina será ligada a rede elétrica de energia. Para cada voo foi determinado utilizar sua autonomia total, considerando a velocidade média máxima e radiação solar da região sudeste do Brasil.

3.1 DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA

3.1.1 O painel fotovoltaico

Para suprir a necessidade energética de carregamento das baterias da aeronave que está sendo estudada neste trabalho, foi selecionado o Painel Solar Fotovoltaico de 245Wp da Yingli Energy YL245P-29b da série de células YGE 60, mostrado na Figura 9. A escolha desse painel deve-se por ser um modelo existente no Centro de Energias Renováveis, onde foi realizado o estudo.

Figura 9 – Painel fotovoltaico 245Wp – Yingli Energy



Fonte: Yingli Solar (2018).

As especificações técnicas e características fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 2, informações como a eficiência do módulo, tensão e outras características do painel fotovoltaico.

Tabela 2: Informações técnicas do painel Yingli Energy YL245P-29b

Potência de Saída	245 Wp
Eficiência do módulo	15,10%
Tensão em $P_{máx}$	29,6 V
Intensidade em $P_{máx}$	8,28 A
Tensão em circuito aberto	37,5 V
Corrente de curto-circuito	8,83A
Dimensões (C/L/A)	1640mm/990mm/35mm

Fonte: Adaptado de Yingli Solar (2018).

3.1.2 Dimensionamento do Sistema de Fornecimento de Energia com o Painel Fotovoltaico

O consumo médio mensal da aeronave pode ser calculado por meio da Equação (1) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$CMD = \frac{P_T}{U} \times \frac{\text{horas de sol}}{\text{dia}} \times \frac{\text{dias utilização}}{\text{mês}} \quad (1)$$

no qual CMD é o consumo médio diário [Ah], P_T é a potência total do sistema [W] e U é a tensão do sistema [V].

A capacidade de carga de cada módulo fotovoltaico pode ser calculada por meio da Equação (2) (PINHO; GALDINO, 2014). Os módulos utilizados neste estudo são os modelos YGE60 do fabricante YINGLI SOLAR, cujas as especificações estão na Tabela 3.

$$CC = h_i \times I_{máx} \quad (2)$$

no qual CC é a capacidade de carga de cada módulo fotovoltaico [Ah], h_i é horas de pico de irradiação solar [horas] e $I_{máx}$ é corrente de potência máxima [A].

A quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo é calculada por meio da Equação (3) (PINHO; GALDINO, 2014), o coeficiente 1,20 considera que um módulo

fotovoltaico deve-se carregar a bateria até uma tensão 20% acima da nominal devido à perda pelo efeito Joule.

$$QMP = \frac{(CMM \times 1,20)}{CC} \quad (3)$$

sendo que QMP é a quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo.

A quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em série é calculada por meio da Equação (4) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$QMS = \frac{U}{U_{mf}} \quad (4)$$

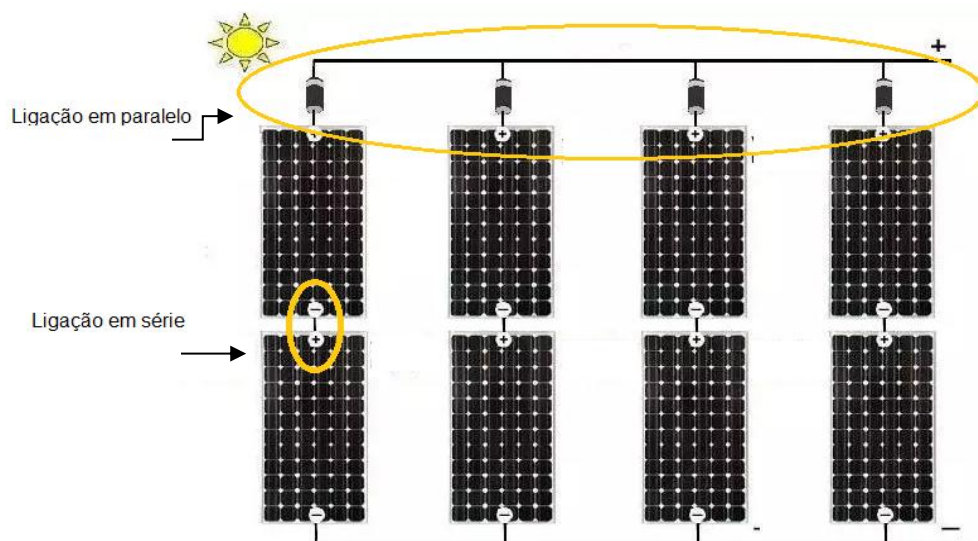
onde QMS é a quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em série e U_{mf} é a tensão VDC de cada módulo fotovoltaico [V].

A quantidade total de módulos fotovoltaicos para a usina é calculada pela equação (5) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$QMT = QMP \times QMS \quad (5)$$

sendo que QMT é quantidade de módulos fotovoltaicos totais utilizados na usina fotovoltaica. A Figura 10 mostra a configuração dos painéis fotovoltaicos ligados em série e em paralelo, como será montado no projeto.

Figura 10 – Associação dos painéis fotovoltaicos em série e paralelo



Fonte: Adaptado de Leiaut (2016).

A corrente de curto circuito do módulo solar é calculada pela equação (6) (PINHO; GALDINO, 2014), com uma margem de segurança de 25% em relação a corrente máxima de cada módulo (PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_{SC} = I_{SC} \times QMP \times 1,25 \quad (6)$$

onde I_{SC} é a corrente de curto circuito do módulo solar [A].

A corrente máxima do controlador é calculada pela equação (7); ela é determinada como sendo a corrente de curto circuito do painel fotovoltaico acrescida de um fator mínimo de segurança de 25%, assumindo que o painel pode receber uma irradiância de até 1.250 W/m², ainda que por curtos períodos de tempo (PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_C = I_{SC} \times QMP \times 1,25 \quad (7)$$

sendo que I_C é a corrente máxima do controlador [A].

3.1.3 Inversor

A potência total AC é calculada pela Equação (8) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$PT_{AC} = P_T \times D_{SS} \quad (8)$$

sendo que PT_{AC} é potência total AC do sistema [W], P_T é a potência total do sistema [W] e D_{SS} são os números de dias sem sol.

O inversor para sistema fotovoltaico deve tolerar surtos de corrente que ocorrem, por exemplo, na partida de motores elétricos, os quais podem exigir valores mais de 10 vezes superiores à corrente nominal do motor em curtos períodos de tempo, antes de entrar em regime normal de trabalho, assim para este projeto a estimativa da potência de surto do inversor é calculada pela equação (9) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$PSI = PT_{AC} \times 2 \quad (9)$$

no qual PSI é a potência de surto do inversor [W].

3.2 AVIÃO ELÉTRICO E SUAS ESPECIFICAÇÕES

As especificações da aeronave para estudo foram adquiridas através de informações do site do fabricante da aeronave Sun Flyer. Nesse trabalho será utilizado para estudo o modelo Sun Flyer 2.

3.2.1 Aeronave com dois assentos e potência do motor de 90 kW

A aeronave Sun Flyer 2 com propulsão elétrica, é de dois assentos. Os dados técnicos como largura da cabine, peso, velocidade média, horas de voo são fornecidos pelo fabricante e estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações da aeronave Sun Flyer 2

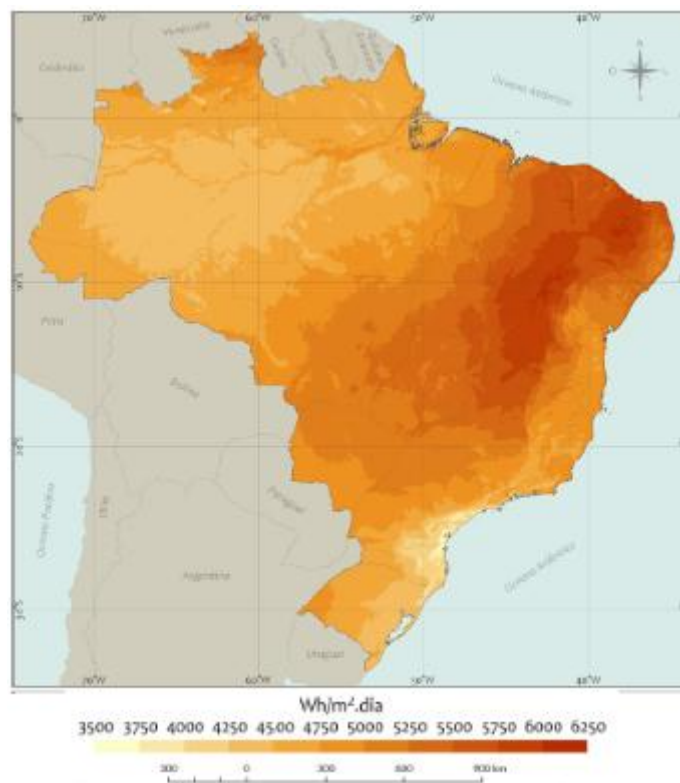
Assentos	2
Envergadura	38 pés (11,60 m)
Relação de planeio	20,6
Potência	90 kW (122,40 HP)
Largura da cabine	46 pol (1,17 m)
Peso bruto	1.900 lbs (860 kg)
Razão de subida	1.050 fpm
Tripulação e passageiros	440 lbs (199,58 kg)
Velocidade	55-135 nós (102 – 250 km/h)
Velocidade de voo (70 nós - 130 km/h)	3,5 h

Fonte: Adaptado Sun Flyer (2018).

3.3 IRRADIAÇÃO SOLAR

A Figura 11 mostra o mapa do Brasil de energia solar na região sudeste com uma faixa de irradiação média anual solar de 5 kWh/m²/dia

Figura 11 – Média anual de radiação solar global



Fonte: Pereira (2017).

3.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Para esse estudo o sistema instalado é do tipo SFCR (Sistema fotovoltaico conectado a rede), que baseia-se na condição de que o custo de geração de eletricidade compensa os custos suplementares em relação ao sistema de abastecimento convencional.

Nesse trabalho é adotado o estudo de análise econômica desenvolvido pela teoria (SILVEIRA, 1994). Para construção e funcionamento da usina fotovoltaica os investimentos necessários estão integrados com aquisição dos materiais, como os painéis fotovoltaicos, inversores e outros pequenos componentes para conexão dos painéis. Ainda deve-se considerar os custos operacionais e de manutenção dessa usina fotovoltaica.

Neste trabalho projetou-se uma usina para Região Sudeste do Brasil com nível de radiação solar de 5 kWh/m²/dia.

No Brasil, segundo o Atlas Solarimétrico (TIBA, 2000), a média diária de Sol na Região Sudeste é de 6 h.

Na Tabela 4 apresenta-se a média de custos para implantação e operação da usina fotovoltaica.

Tabela 4 – Custos para sistema fotovoltaico – ano 2018

Itens	Custo (US\$/kWh)
Módulos fotovoltaicos 245W	0,38
Inversores de frequência	0,28
Operação	0,06
Manutenção	0,02

Fonte: Autoria própria.

É utilizada como taxa de subsídio, considerando que em um futuro próximo o governo financiará a energia fotovoltaica para pequena geração distribuída, de 10% e 50%, disponibilizado pelos programas de desenvolvimento sustentável.

Os fabricantes de módulos fotovoltaicos, em sua grande maioria, garantem um bom funcionamento dos painéis por 25 anos, com uma pequena variação em sua eficiência. Tomando essa informação como verdadeira, será considerado para análise econômica um período de amortização de 1 a 20 anos, aplicando taxas de juros praticadas pelo BNDES de 4%, 8% e 12%.

Na equação (10) apresenta-se o cálculo de custo de produção de energia, levando-se em conta todos os fatores necessários:

$$C_{cel(SGF)} = \left(\frac{I_{SGF} \times f}{H \times E} \right) + C_{op} + C_{ma} \quad (10)$$

onde $C_{el(SGF)}$ é o custo de eletricidade produzida pela usina fotovoltaica em [US\$/kWh], I_{SGF} é o investimento total necessário [US\$], H é o número de horas de operação por ano [h/ano], C_{op} é o custo operacional [US\$/kWh], C_{man} é o custo de manutenção do sistema [US\$/kWh], f é o fator de anuidade [1/ano] e E é a energia elétrica gerada [kW].

O fator anual f é calculado pela equação (11):

$$f = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^k \times \left(\frac{r}{100}\right)}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^k - 1} \quad (11)$$

no qual r a taxa anual de juros [%] e k o período de amortização de capital ou *payback* [ano].

Na equação (12), E é uma estimativa da energia gerada em um ano pela usina fotovoltaica, utilizando-se radiação solar R_a em 5 [kWh/m² ano] para o local onde a planta fotovoltaica será instalada, eficiência do painel η_M [%] e A área de ocupação [m²].

$$E = \frac{\eta_M}{100} \times R_A \times A \quad (12)$$

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADO PARA DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA

Para compor a Tabela 5, foram utilizadas as equações (1) à (12). A usina foi projetada para alimentar uma pequena esquadrilha de 5 aeronaves, do modelo Sun Flyer 2. Com uma média diária de irradiação solar na região de 6h (SOLARGIS, 2018b).

Em dias alternados quanto ao uso das aeronaves. Utilizando 1, 3 e 5 dias da semana, com autonomia máxima de voo.

Tabela 5 – Dimensionamento da usina fotovoltaica

	Equação	1 dia	3 dias	5 dias
Consumo médio diário [Ah]	(1)	37,23	111,7	186,17
Módulo solar em paralelo [Un]	(3)	1	3	5
Módulo solar em série [Un]	(4)	16	16	16
Módulo solar total [Un]	(5)	16	48	80
Potência total do módulo solar [kW]	(12)	4	12	20
Potência total AC do inversor [W]	(8)	600	1750	3000

Fonte: Autoria própria.

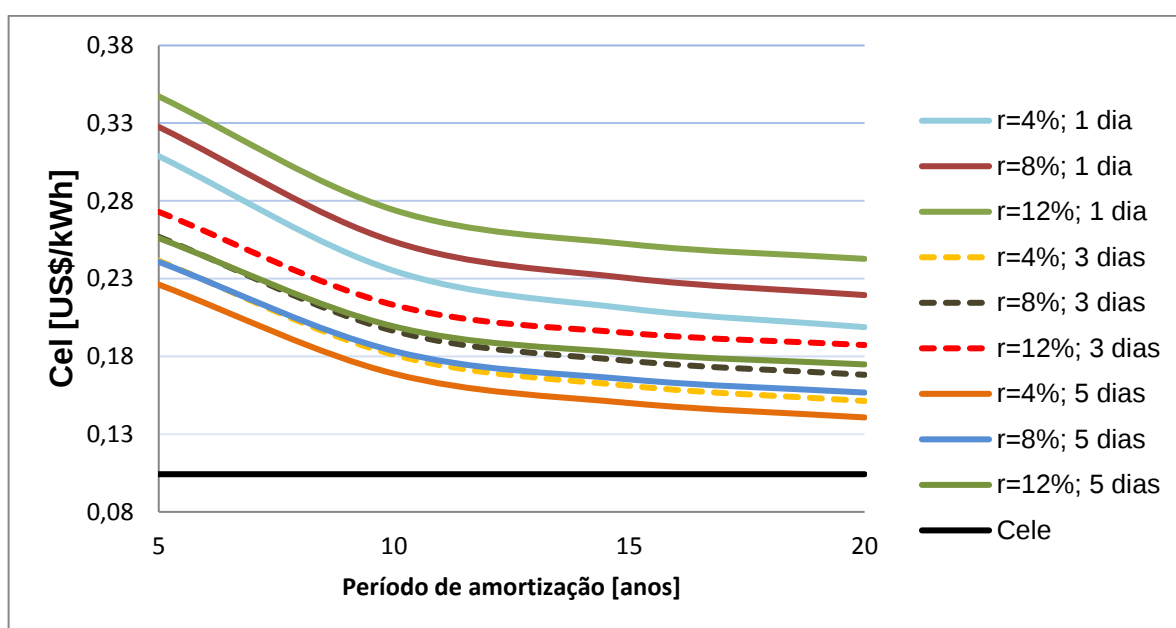
4.2 O RESULTADO PARA A ANÁLISE ECONÔMICA

O custo da geração de energia no sistema fotovoltaico foi calculado com a variação da taxa de juros anual de 4%, 8% e 12%. O custo da produção diminuiu ao longo dos anos devido à taxa de amortização, que está relacionada com o fator de anuidade e depende da taxa de juros considerada. Outro fator de grande influência no custo de produção de energia elétrica é o período de operação anual da planta H , calculado na equação (10). Juntamente com a média de preço da energia elétrica fornecida por uma concessionária na região Sudeste no ano de 2018.

Neste trabalho considerou 6 horas diárias, resultando em um período de 2190 horas de operação durante um ano, com custo médio nacional de eletricidade da rede convencional de 0,13 US\$/kWh.

A Figura 12 mostra o resultado da análise econômica para custo de geração de energia no sistema fotovoltaico, considerando um subsídio do governo de 10% e consumo de energia para utilização de uma esquadrilha de 5 aviões, em 1, 3 e 5 dias da semana, com variação da taxa de juros.

Figura 12 - Custo da eletricidade gerada pelo SFCR com subsídio de 10%



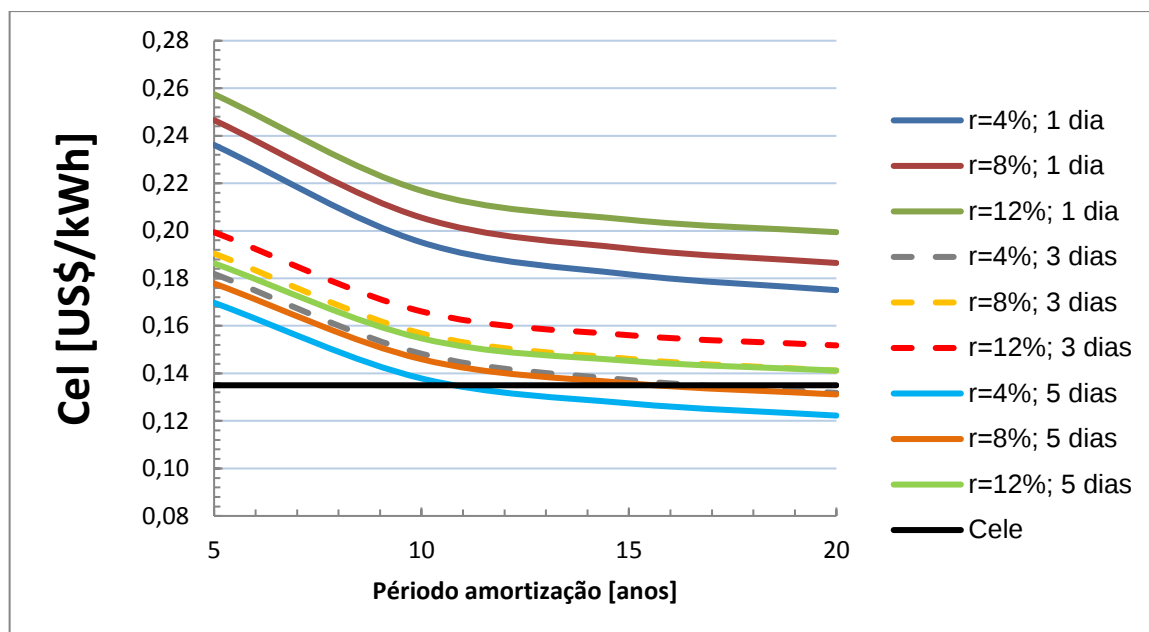
Fonte: Autoria própria.

A Figura 12 mostra que o custo da eletricidade gerada pelo sistema fotovoltaico (SFCR) com subsídio de 10% é inviável em relação ao custo médio nacional de eletricidade da rede (Cele).

Com utilização da esquadrilha de aviões por 1 dia, 3 ou 5 dias não ocorre o payback em um prazo menor que 20 anos.

A Figura 13 apresenta o resultado da análise econômica para custo de geração de energia no sistema fotovoltaico, considerando para um futuro próximo de um subsídio do governo de 50% no investimento de um sistema fotovoltaico, para uma esquadrilha de 5 aviões, em 1, 3 e 5 dias da semana, com variação da taxa de juros.

Figura 13 - Custo da eletricidade gerada pelo SFCR com subsídio 50%



Fonte: Autoria própria.

O custo da eletricidade gerada pelo sistema é inviável se utilizado apenas 1 dia. O sistema torna-se viável a partir de 3 dias de uso com taxas de juros menor que 8%. Para 5 dias de utilização, somente taxas de juros menores que 8% tornam o sistema viável em um período menor que 20 anos.

4.3 CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE ECONÔMICA ENTRE O AVIÃO COM PROPULSÃO ELÉTRICA E O COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

A Tabela 6 mostra os dados técnicos das aeronaves, motor de combustão interna e motor propulsão elétrica considerados no estudo.

Tabela 6 – Dados técnicos Aeronave MCI e elétrica

Descrição	Dados Técnicos	
	MCI	Elétrico
Marca/modelo	Cessna 172	Sun Flyer 2
Motor	Motor de 6 cilindros - Lycoming IO-360-L2A	Siemens SP70 D
Massa bruta	743 kg	860 kg
Potência máxima	119 kW	90 kW
Composição da mistura	injeção de gasolina de aviação	
Velocidade máx em km/h	302 km/h	250 km/h
Consumo de combustível	25 l/h	6 kWh/h
Tipo de combustível	Gasolina de aviação	Elétrico
Autonomia em km	1185 km	455 km

Fonte: Autoria própria.

Nessa tabela os dados técnicos como massa bruta são valores das aeronaves com dois passageiros e sem combustível, no caso da aeronave a combustão. A autonomia das aeronaves são dados que tem como parâmetro autonomia máxima. A aeronave Cessna 172 apresenta uma autonomia muito maior em comparação ao Sun Flyer , em virtude da aeronave a combustão ser capaz de transportar grande quantidade de combustível.

A Figura 14 apresenta a aeronave de propulsão elétrica Sun flyer (b) e o Cessna 172 (a) aeronave de motor de combustão interna utilizado como exemplo para os cálculos.

Figura 14 – Aeronaves com MCI (Cessna 172) e com motor elétrico (Sun Flyer 2)



(a)



(b)

Fontes: (a)EJ Escola de aeronáutica civil (2018); (b) Sunflyer (2018).

A Tabela 7 compara o custo operacional de uma aeronave de propulsão elétrica Sun Flyer 2 e uma aeronave combustão do modelo Cessna 172, que apresenta aspectos dimensionais semelhantes a aeronave em estudo.

Tabela 7 – Comparativo entre custo operacional do Sun Flyer 2 com Cessna 172

	Cessna 172	Sun Flyer 2
Energia (AVGas/kW)	\$44.00	\$3.00
Inspeções	\$22.40	\$2.40
Bateria reserva	N/A	\$8.00
Depreciação motor	\$10.00	\$0.60
Troca de Óleo	\$4.80	N/A
Manutenção de ignição	\$4.56	N/A
Manutenção de acessórios	\$2.55	N/A
Total custo operacional	\$88.00	\$14.00
Total custo em Reais ¹	R\$330,00	R\$52,64

Nota 1: cotação do dólar em 8 out. 2018: R\$3,76.

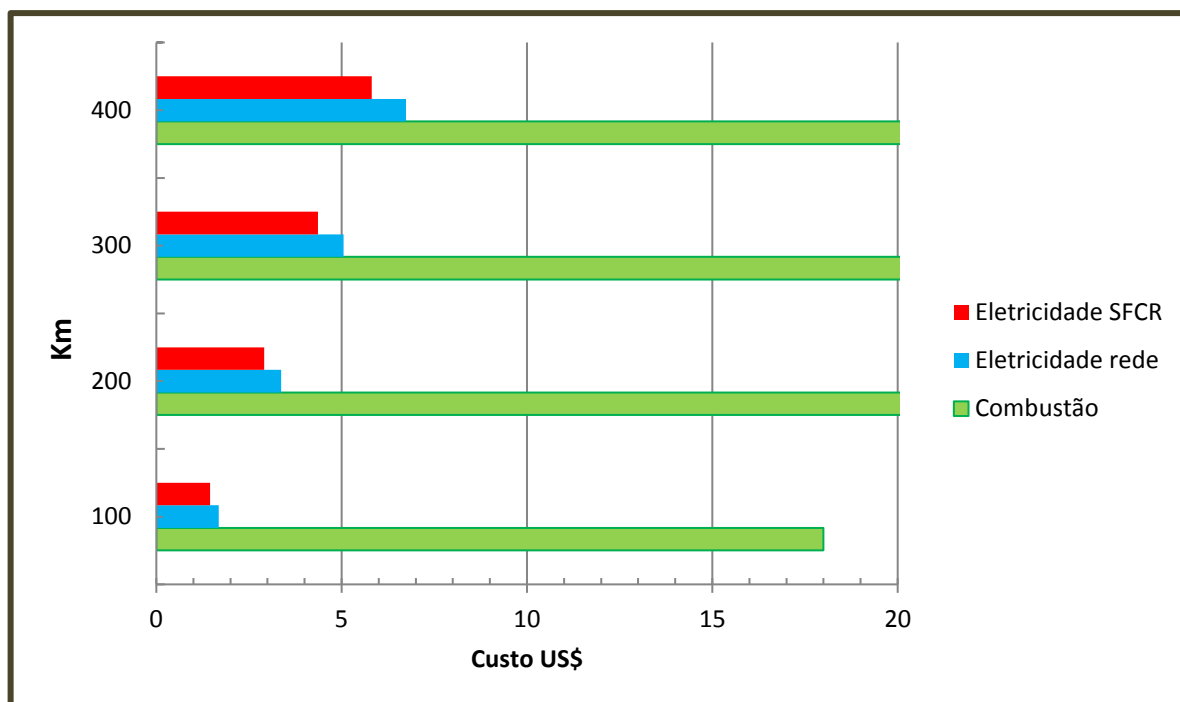
Fonte: Adaptado Sunflyer (2018).

Com a tabela 7 é possível constatar que para aeronave elétrica são inexistentes custos como: troca de óleo, manutenção de ignição e manutenção de acessórios. Bem como outros custos operacionais reduzidos deixando evidente que a aeronave com propulsão elétrica tem um custo seis vezes menor se comparado a aeronave com motor combustão interna.

4.3.1 Resultado da análise de comparação de custos entre o avião com propulsão elétrica e o avião com motor a combustão interna

Foi realizada uma comparação de custos quantitativos com variação no tipo de fonte energética utilizada, conforme o gráfico da Figura 15, na qual considerou-se o preço de custo médio de eletricidade da rede de US\$ 0,13 / kWh. O custo da eletricidade gerada pela usina fotovoltaica foi de US\$ 0,0937 / kWh (taxa para 3 dias de uso e 50% de subsídio), e o custo do combustível aeronáutico de US\$ 2,16 por litro consumido pela aeronave Cessna 172.

Figura 15 – Comparação de custos entre os aviões Sun Flyer e Cessna 172



Fonte: Autoria própria.

Como apresentado na Figura 15, o custo da energia consumida pelo avião com propulsão elétrica é sempre menor que o custo do avião com motor combustão interna, para todos os valores de distâncias percorridas consideradas sem contar os custos com manutenção de uma aeronave a combustão, bem como todos os fatores ambientais e a não emissão de gases de combustão.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou concluir que o objetivo principal do trabalho foi alcançado. O dimensionamento da usina fotovoltaica conectada a rede permitiu avaliar a viabilidade econômica de sua implantação com a finalidade de geração de energia elétrica para alimentar uma esquadilha de cinco aviões do modelo Sun Flyer 2.

A usina foi dimensionada para diferentes situações de uso dessas 5 aeronaves. A primeira situação considerou primeiramente uso apenas de 1 dia, o sistema não se mostrou viável economicamente. Somente a partir de três dias de uso obteve-se um *payback* em torno de oito anos tornando a implantação da usina fotovoltaica viável.

Outro fator de destaque, responsável em tornar o sistema viável economicamente, é o subsídio governamental considerado na análise econômica. Foi utilizado uma taxa de subsídio de 10% e 50%. Ao comparar os resultados, verificou-se que quanto maior a taxa de subsídio mais rápido o retorno do investimento assim como decréscimo do custo da eletricidade gerada na usina fotovoltaica. Outro benefício é que todo período excedente de geração de energia pelos painéis será fornecido para a rede elétrica, contribuindo diretamente com o sistema de energia e utilização posterior.

Finalizando o estudo, a análise de viabilidade econômica diante de uma aeronave com propulsão elétrica e a aeronave com motor a combustão, o custo foi 12 vezes menor para aeronave a propulsão elétrica utilizando a usina fotovoltaica para suprimento de energia. Além da ótima razão entre o custo e o benefício, os fatores ambientais como a utilização do combustível fóssil e gases de exaustão são inexistentes para um avião elétrico.

Como sugestão de trabalhos futuros propõe-se e uma análise econômica e ambiental como taxa de emissão de poluentes. Outro fator que pode ser analisado são os componentes de manutenção entre avião com motor elétrico e avião com motor combustão, seu tempo de vida útil e a substituição dos painéis e reciclagem da usina fotovoltaica ao fim da vida útil de geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

AVILÉS, Sandra Milena Aragón; SOUZA, Teófilo Miguel de. **Sistemas renovables con energía solar**. São Paulo: Páginas & Letras, 2011.

BAHAROUZU, E.; SOYKAN, G.; OZERDEM, M. B. Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors. **Energy**, Peru, v. 140, part 2, 2017, p. 1368-1377. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421731513X>>. Acesso em: 23 set. 2018.

BUSINESS INSIDER. **Sun flyer**. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/electric-aircraft-sunflyer-2016-5>>. Acesso em: 06 jan. 2018.

BYE AEROSPACE. **Aero electric aircraft corporation**. Disponível em: <<https://www.byeaerospace.com/projects/>>. Acesso em 23 set. 2018.

CASTRO, T.S. **Análise econômica e ambiental de sistemas de geração alternativa para suprimento energético de carros elétricos**. 2018. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

CASTRO, T.S.; SOUZA, T.M.; SILVEIRA, J.L. 2017. Feasibility of Electric Vehicle: Electricity by Grid × Photovoltaic Energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Brasil, v.69, 2017, pp.1077-1084.

CRESESB. **Energia solar princípios e aplicações**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em 20 fev. 2018.

EJ ESCOLA DE AERONÁUTICA CIVIL. **Aeronave a combustão - Cessna 172**. Disponível em < <https://www.ej.com.br/aeronave/cessna-172-g1000>>. Acesso 07 out 2018.

GALDINO, M.; LIMA, J. H. G.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T.; 2009. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**. Revista da DIRENG: 17–25. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/direng.pdf>>. Acesso em 20 fev. 2018.

GORDON, J. M. **The State of the Art: ISES Position Papers**. Solar Energy – James & James (Science Publishers), 2001.

HOMA, J. M. **Aeronaves e Motores: Conhecimentos Técnicos**. São Paulo: ASA, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook**. Disponível em <http://www.worldenergyoutlook.org/database_electricity/electricity>. Acesso em 02 set. 2018.

KLOTZEL, E. **Avião elétrico deixa de ser promessa**. Aeromazine. Disponível em: <http://aeromazine.uol.com.br/artigo/aviao-eletrico-deixa-de-ser-promessa_2027.html>. Acesso em 31 jul. 2018.

LEIAUT. **Associação de painéis solares**. Disponível em: <<https://www.leiautdicas.com/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

NIEDZIALKOSKI, R. K. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. 2013. 57f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. **Painéis e componentes solares**. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/passos-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 27 nov 2018.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012. 224p.

SHAOHUA, M.; SHULI, W. S.; ZHANG, C. **A method to improve the efficiency of an electric aircraft propulsion system**. Energy, vol. 140, 2017, p. 436-443. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217314706>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

SILVEIRA, J. L. **Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudo de Casos para o Setor Terciário**. 1994. 216 f. Universidade Estadual de Campinas, 1994.

SIEMENS. **Portfólio** (Siemens eAircraft - Disrupting Aircraft Propulsion, 2018). Disponível em: <<https://www.ie-net.be/sites/default/files/Siemens%20eAircraft%20-%20Disrupting%20Aircraft%20Propulsion%20-%20OO%20JH%20THO%20-%2020180427.cleaned.pdf>>. Acesso em: 24 de out. 2018.

SUNFLYER. **Sun flyer**. Disponível em: <<http://sunflyer.com/specifications/>>. Acesso em 23 set. 2018.

TIBA, Chigeru. **Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. v. 1. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>>. Acesso em 19 março 2018.

WALD, M. L. **O charme e o poder das renováveis**. Todas As Fontes de Energia, São Paulo, p.8-13, 2008-2009.

YINGLI SOLAR. **Painéis e componentes solares**. Disponível em:<<http://www.yinglisolar.com/br/products/multicrystalline/yge-60-cell-series/>>. Acesso em 20 set. 2018.