

PROJETO ZEFIRO: PROPOSTA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM DIRIGÍVEL SOLAR DE ELEVADA AUTONOMIA PARA MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS E EÓLICAS

Hugo Francisco Lisboa Santos – engenharia@syrasolar.com
Pedro Vassalo Maia da Costa – comercial@syrasolar.com
Ana Cláudia Silva Gonçalves Motta – ana.motta@syrasolar.com
Matheus Bezerra Pimentel - matheus.pimentel@syrasolar.com
Empresa SyraSolar

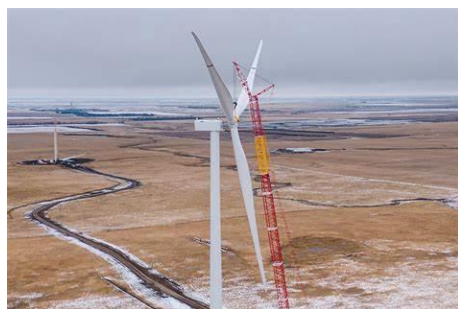
Resumo. O monitoramento e inspeção de usinas eólicas e fotovoltaicas é um grande desafio para empresas do setor elétrico, especialmente durante sua construção. A extensão dessas instalações faz com que grandes deslocamentos sejam necessários. O projeto Zefiro está desenvolvendo um dirigível solar de elevada autonomia a ser utilizado para realização dessas operações. Esse dirigível será capaz de monitorar a construção ou operação de usinas de forma contínua e com autonomia para várias semanas. Dentro desse projeto, têm sido desenvolvidas diversas atividades, tanto teóricas quanto experimentais. Foi realizado um levantamento de dados meteorológicos utilizando as bases de dados do INPE e do INMET. Com base nesses valores, foi modelada a geração e consumo de energia do dirigível nessas condições. Tal modelagem indicou a viabilidade da proposta. Adicionalmente, foram realizados testes experimentais para validar o modelo teórico desenvolvido e para avaliar a configuração do dirigível e os processos fabris.

Palavras-chave: Drones, Monitoramento, Inspeção.

1 INTRODUÇÃO

O projeto Zefiro tem como objetivo atacar o problema de monitoramento e inspeção de áreas extensas; esse que sempre foi um desafio para diversos setores. Há vários exemplos desse tipo de situação, descritos abaixo.

- **Setor elétrico:** monitoramento e inspeção deficiente de Usinas Hidrelétricas, Linhas de Transmissão e Distribuição, Subestações, Usinas Eólicas e Fotovoltaicas. Isso traz problemas como: a) obstrução da entrada da turbina por rejeitos despejados de forma irregular, b) Afogamentos em reservatórios de hidrelétricas, c) falhas estruturais em linhas de transmissão, d) queda de árvores em linhas de distribuição, e) acidentes com animais nas linhas de distribuição, f) Incêndios em transformadores da rede de distribuição ou em subestações, g) furtos de energia elétrica (Figura 1).



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Vista aérea da construção de uma usina eólica e (b) vista aérea de uma usina hidrelétrica em operação.

- **Setor agrícola:** monitoramento deficiente de lavouras e rebanhos. Isso leva a problemas como: a) perda de animais, b) furto de animais, c) demora na identificação de pragas, d) demora na identificação de doenças.
- **Construção civil:** dificuldade para monitoramento em tempo real de grandes obras de engenharia, como rodovias, ferrovias, pontes, usinas fotovoltaicas e usinas eólicas. Isso leva a problemas como: a) dificuldade no acompanhamento da obra, b) problemas logísticos, c) acidentes.
- **Setor Portuário:** dificuldade para monitoramento de canais e de acompanhamento da manobra de navios. Isso gera problemas como: a) encalhamento, b) abalroamentos, c) demora na execução das manobras, d) tempo excessivo para entrada e saída do porto.
- **Segurança Pública:** A dificuldade de monitoramento de áreas de risco, praias e parques leva a problemas como: a) assaltos e furtos, b) furtos massivos (“arrastões”), c) crescimento de facções criminosas (tráfico e milícias).

- **Defesa:** o patrulhamento de fronteiras e da costa brasileira é um grande desafio para as forças de segurança. Falhas nesse patrulhamento levam a problemas como: a) contrabando em vias fluviais, b) contrabando em portos, c) pesca ilegal em águas territoriais e na zona econômica exclusiva, d) pirataria em portos, e) pirataria marítima.

Um **Dirigível Solar de Elevada Autonomia**, como o Zefiro, traz ganhos significativos para as atividades de monitoramento e inspeção em áreas extensas:

- **Elevada Autonomia:** ao utilizar o hélio (não inflamável) para sustentação, o dirigível apresenta baixo consumo de energia. Adicionalmente, ao utilizar módulos fotovoltaicos, consegue recarregar as baterias, podendo permanecer de semanas a meses no ar.
- **Monitoramento Contínuo:** graças à elevada autonomia, o dirigível permite o monitoramento contínuo de áreas amplas, algo inviável com outras plataformas. Permite, assim, que a área seja monitorada ininterruptamente por longos períodos.
- **Inspeção Termográfica:** a utilização de câmeras termográficas permite a visualização noturna, com destaque para pessoas e animais nas imagens. Adicionalmente, a utilização de imagens termográficas permite a identificação de pontos quentes em equipamentos, indicando potenciais falhas (Figura 2a).
- **Inspeção Visual:** a realização de inspeções visuais permite o acompanhamento contínuo das mais diversas atividades ou a inspeção de ativos de grande área ou de elevado comprimento, como linhas de transmissão (Figura 2b).
- **Identificação de ocorrências em tempo real:** o monitoramento contínuo, associado à grande cobertura do Zefiro permitem a identificação de ocorrências em tempo real e a tomada imediata das ações necessárias.
- **Aumento significativo da área coberta:** a possibilidade de posicionamento contínuo do dirigível dezenas ou centenas de metros acima do solo permite um aumento significativo da área coberta, seja visualmente, seja com câmeras infravermelhas.

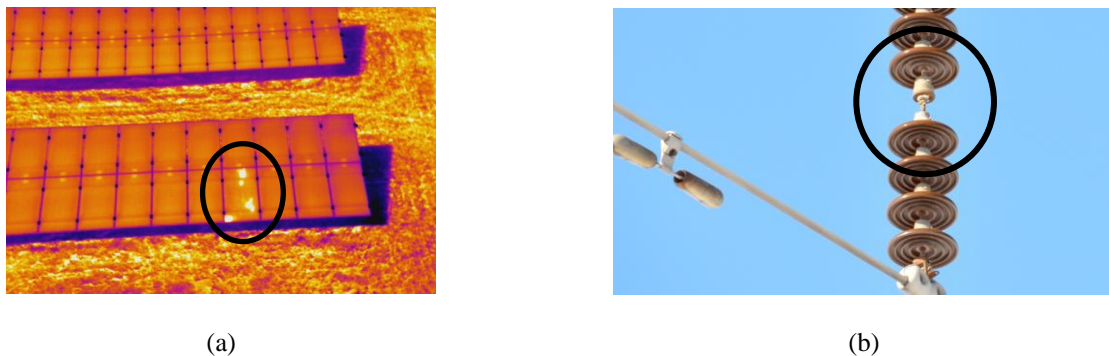


Figura 2 – (a) Imagem termográfica de um defeito em um módulo fotovoltaico e (b) vista aérea de uma falha em um isolador.

O presente artigo aborda particularmente o monitoramento e inspeção de usinas eólicas e fotovoltaicas. Tanto durante sua construção quanto durante sua operação. E os ganhos que um dirigível solar de elevada autonomia traz nesse contexto.

1.1 Monitoramento da construção de usinas eólicas e fotovoltaicas

Devem ser realizadas diversas atividades de monitoramento durante a construção de usinas eólicas e fotovoltaicas. Uma das principais atividades é o acompanhamento do cronograma de obra. Para tal, normalmente são preenchidos Boletins Diários de Obra (BDO). Nesses boletins, a equipe responsável pela execução reporta as atividades realizadas ao longo do dia e, eventualmente, manda algumas fotos do andamento. Contudo, tal atividade está limitada pelo texto que consegue ser preenchido no BDO e não permite uma visualização ampla, detalhada e em tempo real do que está ocorrendo na obra.

Martins (2017) apresenta dados da construção do complexo fotovoltaico de Pirapora. A partir do texto é possível observar a grande extensão do empreendimento. E, apesar da construção ter sido modularizada, pode-se observar o grande desafio técnico de realizar o monitoramento da construção da usina (Figura 3).

O Zefiro está sendo proposto especificamente para essa situação. Ele permite a visualização da obra como um todo em tempo real. Adicionalmente, por se tratar de um dirigível, pode ser deslocado para diferentes posições, de modo a permitir que o operador consiga visualizar em detalhes o que está ocorrendo em determinado ponto.

1.2 Monitoramento da operação de usinas eólicas e fotovoltaicas

Durante a operação de usinas eólicas e fotovoltaicas, normalmente são realizadas diversas atividades. Uma atividade realizada continuamente é a segurança do perímetro. Para tal, podem ser utilizadas diferentes ferramentas, como sensores

e câmeras. Essa atividade pode ser realizada por um Dirigível Solar de Elevada Autonomia, como o Zefiro, em apoio aos vigilantes presentes no local.

Outra atividade é a inspeção periódica dos módulos fotovoltaicos, tanto inspeção visual quanto a inspeção com a utilização de câmeras termográfica, bem como das subestações e linhas de transmissão associadas (Figura 2). No caso das usinas eólicas, além da inspeção visual, há ainda o sensoriamento acústico.

A utilização de um Dirigível Solar de Elevada Autonomia, como o Zefiro, permite que essas atividades possam ser realizadas sem a necessidade de deslocamento.



Figura 3 - Imagem aérea da construção das usinas Pirapora X e Pirapora IX – 2 (Martins, 2017).

1.3 Dirigíveis

Um dirigível é uma aeronave mais leve do que o ar, que pode ser direcionada e impulsionada através do ar, utilizando-se lemes e hélices. Ao contrário de aeronaves mais pesadas do que o ar, como aviões e helicópteros, os dirigíveis sustentam-se através do uso de uma grande cavidade que é preenchida com um gás menos denso do que o ar, como o gás hélio ou como o gás hidrogênio (Khoury, 2012).

Os dirigíveis foram as primeiras aeronaves a realizarem um voo controlado, com propulsão. Eles foram muito utilizados até a década de 1940, quando suas capacidades foram superadas pelos aviões. Seu declínio continuou com a ocorrência de acidentes de grandes proporções, como o acidente com o Hindenburg e a destruição do USS Akron.

Apesar disso, continuam sendo utilizados em alguns nichos de aplicação, como propaganda aérea, plataforma para câmera em eventos esportivos, observação aérea e como base de monitoramento. Nessas aplicações, sua capacidade de flutuar em um mesmo local por um período prolongado de tempo supera a necessidade de velocidade e capacidade de manobra.

1.4 Dirigíveis autônomos ou semi-autônomos

Dirigíveis autônomos têm sido objeto de trabalhos acadêmicos há mais de duas décadas. Em alguns artigos são analisadas possíveis aplicações para veículos aéreos não tripulados controlados remotamente. Elfes (1998), considera diversas aplicações de dirigíveis semi-autônomos para uso em operações de monitoramento. Cita-se o controle do tráfego, a inspeção de tubulações e de linhas de transmissão, a prospecção mineral e arqueológica e a garantia da lei e da ordem. Cita-se ainda seu uso em pesquisas e monitoramento ambiental, climático e da biodiversidade.

Vaeth (2006), analisa a possibilidade de utilização de dirigíveis para o sensoriamento remoto em regiões oceânicas. Os dirigíveis apresentam diversas vantagens para a oceanografia, como a possibilidade de observação de uma determinada atividade por tempo indeterminado. Outra vantagem é o uso de determinadas antenas, que não podem ser colocadas em aviões e helicópteros devido a suas dimensões. Cita-se também sua estabilidade e o baixo nível de ruído.

Khoury (2012) apresenta algumas aplicações futuras para os dirigíveis, autônomos ou não. Podem-se citar o controle de fronteiras, o combate a incêndios, seu uso como base de retransmissão de sinais, o transporte de cargas pesadas e o transporte de massa. Zhang (2020) considera algumas possíveis aplicações de dirigíveis na estratosfera.

O Projeto Noamay, antigo projeto Aurora, é um dos principais projetos já realizados nessa área. Está em desenvolvimento há mais de duas décadas pela Unicamp, e já deu origem a diversos artigos, como sintetizado por Carvalho (2021). Dentro desse projeto, inicialmente foi adquirido um dirigível era rádio-controlado, com tração vetorizada, profundores e lemes. Mais recentemente, foi projetado e construído um dirigível de maior porte, com quatro motores vetorizados. O controle é realizado a partir de uma estação em terra, responsável por receber as imagens de vídeo e por enviar os comandos para os motores e para as superfícies de controle. Além disso, a automatização do sistema é feita utilizando-se diferentes estratégias de controle, desde PID inicialmente até Inversão Dinâmica Não-Linear (INDI), mais recentemente. Foram realizados alguns testes de campo com esses dirigíveis.

1.5 Dirigíveis Solares

Os dirigíveis solares têm sido objeto de estudo já há algumas décadas. Kröplin e Schäfer (1995) apresentam o projeto Lotte, conduzido na década de 90 e que configura um dos resultados mais conhecidos da literatura. A equipe do projeto Lotte participou do World Solar Challenge, no deserto australiano. O dirigível Lotte 2 conseguiu percorrer 330 km em

quatro dias. Foi utilizada uma estrutura semi-rígida, células cristalinas sobre um filme plástico e um único motor posicionado na parte de trás do dirigível.

Mais recentemente, Bents (2011) apresentou o projeto conceitual de um veículo aéreo, não tripulado, mais leve que o ar, para aplicação em baixas e médias altitudes. Foi avaliado um dirigível de 600 kg, com 100 m de comprimento e 15 m de diâmetro, para altitudes de até 9.000 m. Nas simulações foi considerado que o dirigível manteria uma velocidade constante de 21 m/s e que permaneceria no ar por 100 dias. Esse dirigível utiliza módulos fotovoltaicos para geração de energia, geradores de hidrogênio para armazenamento de energia e células combustíveis para recuperação da energia armazenada.

Por outro lado, têm havido diversos trabalhos para utilização de dirigíveis solares na estratosfera, com diferentes estratégias de controle. Desde o trabalho inicial de Colozza (2003) até trabalhos recentes, como o de Zhang (2020). Em todos eles, ressalta-se o grande potencial de dirigíveis estratosféricos como plataformas de grande altitude para observação científica, monitoramento militar e missões de comunicação. Normalmente são considerados módulos fotovoltaicos para geração de energia, hidrogênio como gás de sustentação, geradores de hidrogênio para reposição do gás e armazenamento de energia e células combustível para recuperação da energia armazenada.



Figura 4 – (a) Foto do dirigível Lotte (Kröplin e Schäfer, 1995) e (b) conceito de um dirigível estratosférico (Colozza, 2003).

1.6 O Projeto Zefiro

O Projeto Zefiro tem sido desenvolvido pelos autores há alguns anos. Dentro desse projeto está sendo desenvolvido um dirigível solar de elevada autonomia. Esse dirigível é alimentado por módulos fotovoltaicos e possui um controlador de carga com seguidor de ponto de máxima potência (MPPT). A energia gerada é direcionada para os motores e para baterias de lítio através de controladores de carga. Esse armazenamento em baterias permite sua utilização durante a noite. Para utilização de baterias de lítio, foi acrescentado ainda um balanceador de carga para garantir o equilíbrio de tensão entre as células da bateria durante a recarga. Até o momento, foi realizado um desenvolvimento teórico, foram realizados testes de laboratório e foi construído um dirigível para prova de conceito. Os trabalhos realizados até o momento serão apresentados de forma breve no presente artigo.

2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

Nessa etapa, foram obtidos dados da velocidade do vento e irradiação solar, com base em dados das estações da Rede Sonda, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2021). A rede sonda possui estações anemométricas e radiométricas que coletam dados com periodicidade de 1 s. Alternativamente, poderia ser utilizada a rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022). A rede de estações do INMET possui grande cobertura nacional e os dados são obtidos a cada segundo e agregados para registro horário. As estações da rede Sonda estão apresentadas na Figura 5 e as estações do INMET estão apresentadas na Figura 5. Para planejamento das operações, os dados do INMET são mais adequados, devido à maior cobertura nacional e à disponibilidade de dados em tempo real. Contudo, para projeto de engenharia e para análises conceituais, a rede Sonda se mostra mais vantajosa. Isso ocorre por causa do menor período de amostragem dos dados, de apenas 1 s, contra 1 h do INMET. E também pela disponibilidade de dados em diferentes alturas, a 10 m, a 25 m e a 50 m em algumas estações. Desse modo, optou-se pela utilização de dados da Rede Sonda no presente trabalho. Foram obtidos aproximadamente 525 mil dados para cada medição das estações radiométricas. Adicionalmente, foram obtidos aproximadamente 52 mil dados para cada parâmetro das estações anemométricas. As medidas em questão são:

- Velocidade do vento a 10 m e, se disponível, também a 25 m e a 50 m.
- Direção do vento a 10 m e, se disponível, também a 25 m e a 50 m.
- Radiação global horizontal.
- Radiação direta normal.
- Radiação difusa horizontal.

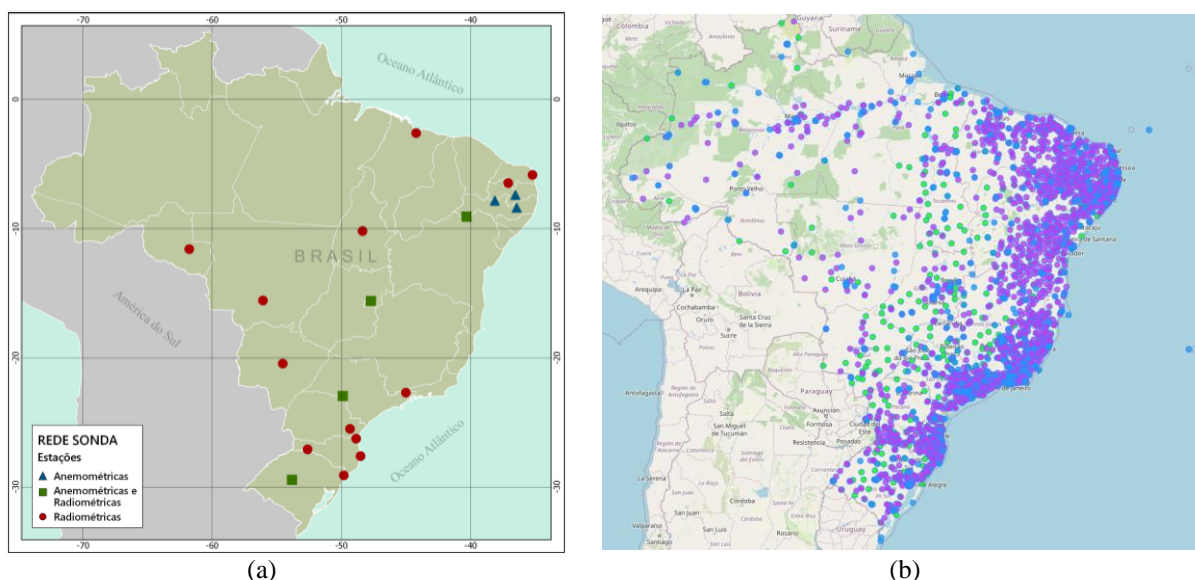


Figura 5 – (a) Estações da rede Sonda do INPE (INPE, 2021) e (b) estações da rede do INMET (INMET, 2021).

2.1 Velocidade e direção do vento

Inicialmente, foi obtida uma distribuição estatística da velocidade e da direção do vento a 10 m e, quando disponível, a 25 m e a 50 m. A Figura 6a apresenta a distribuição estatística da velocidade do vento na estação de Petrolina. Pode-se observar uma concentração dos valores de velocidade do vento próximo de 2 m/s, diminuindo a frequência estatística conforme a velocidade do vento aumenta. Por outro lado, a Figura 6b apresenta a distribuição estatística da direção do vento, também na estação de Petrolina. Pode-se observar uma predominância de ventos na direção de aproximadamente 145°. Por outro lado, há pouca ocorrência de vento em direções entre 0 e 50° e entre 200° e 360°. Desse modo, para operação nessa região, o dirigível tenderá a ficar direcionado para o sudeste a maior parte do tempo.

Essa análise foi realizada também para outras estações, com resultados similares.

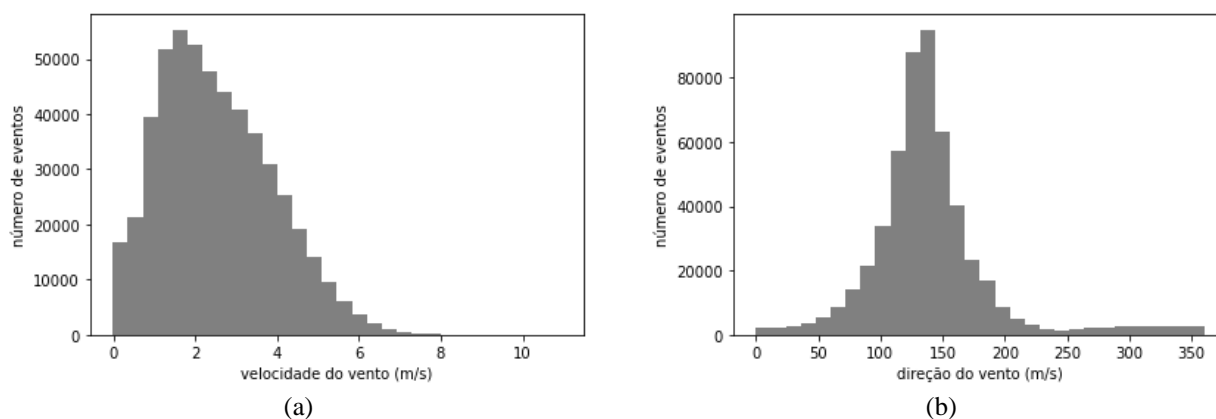


Figura 6 – Distribuição estatística (a) da velocidade do vento e (b) da direção do vento.

2.2 Irradiação solar

Foram obtidos e analisados também os dados de irradiação global horizontal. A Figura 7 apresenta a distribuição estatística da irradiação solar. Na Figura 7a, é considerado o período noturno, de modo que há uma quantidade significativa de pontos com geração muito baixa ou nula. Por outro lado, a Figura 7b apresenta a distribuição estatística da radiação desconsiderando o período noturno. Pode-se observar uma distribuição aproximadamente linear, com predominância para os valores com menor irradiação solar. Pode-se observar ainda alguma concentração próximo de 900 W/m².

2.3 Influência da Altitude na velocidade do vento

A altitude tem influência significativa na velocidade do vento. Há dois grandes modelos para isso, o modelo logarítmico, derivado de modelos físicos e o modelo de potência, baseado em ajuste empírico. Nesse trabalho, o modelo de potência foi tomado como base, seguindo a indicação de Sigfried (2014). Esse modelo pode ser descrito a partir da seguinte equação:

$$V_w(h) = V_{anem} \left(\frac{h}{h_{anem}} \right)^\alpha \quad (1)$$

onde V_w é a velocidade que se deseja estimar, V_{anem} é a velocidade na altura do anemômetro, h é a altura na qual se deseja estimar a velocidade, h_{anem} é a altura onde se encontra o anemômetro, normalmente 10 m do solo, e α é o coeficiente de Hellman. O expoente α possui um valor teórico igual a $1/7$, mas na prática pode variar um pouco.

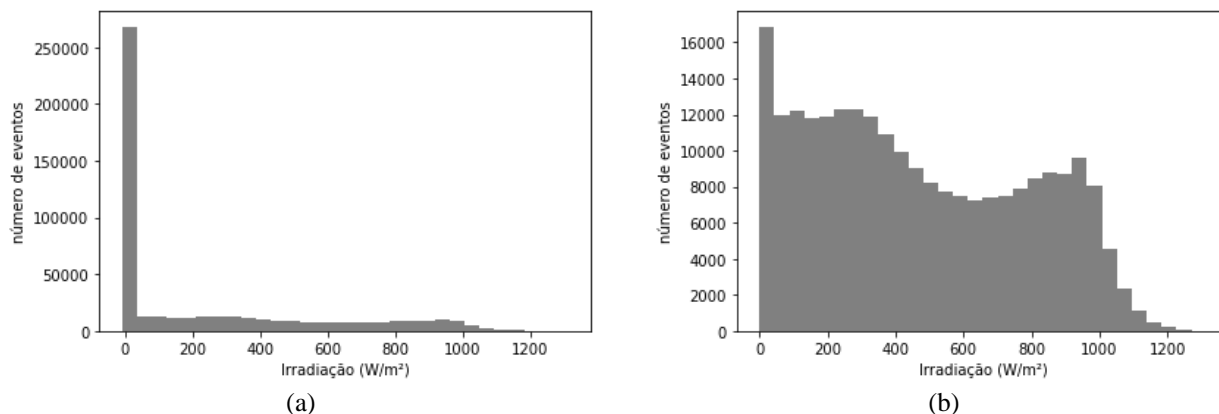


Figura 7 – Distribuição estatística da irradiação solar (a) considerando e (b) desconsiderando o período noturno.

2.4 Estimativa do coeficiente de Hellman para as estações analisadas

O coeficiente de Hellman varia significativamente com diversos parâmetros climáticos, inclusive a irradiação solar. Desse modo, a fim de avaliar o coeficiente de Hellman nas estações analisadas, foram tomados como base os valores de velocidade a 25 m e a 50 m nas estações que possuem medição anemométrica. A Figura 8a apresenta a distribuição estatística da relação de velocidades e a Figura 8b apresenta a distribuição estatística do coeficiente de Hellman, ambos para a estação de Petrolina. Pode-se observar uma distribuição aproximadamente triangular com máximo em 0,25.

Nessa análise, foram considerados apenas medições com valores superiores a 2 m/s, tanto a 25 m quanto a 50 m. Tal consideração foi feita após análise dos dados, pois as medições com valores pequenos apresentam incerteza experimental elevada e indicavam valores do coeficiente de Hellman extremamente elevados e pouco realistas. Cabe ressaltar que também foram realizadas análises restringindo a valores superiores a 1 m/s e restringindo a valores superiores a 3 m/s. Os resultados obtidos foram similares ao restringir os valores acima de 1 m/s, 2 m/s e 3 m/s.

3 MODELAGEM DO DIRIGÍVEL

Para modelagem do balanço de energia do dirigível, foram considerados três grupos: 1) a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, 2) a energia consumida pelos motores para compensação do vento e 3) a energia consumida pelos componentes eletrônicos. Cada um dos grupos será detalhado a seguir.

3.1 Energia gerada pelo módulo fotovoltaico

A energia gerada ao longo do tempo nos módulos fotovoltaicos dE_g/dt é dada por (adaptado de Duffie e Beckham, 2003):

$$\frac{dE_g}{dt} = \frac{P_{fv}}{I_{ref}} \cdot PR \cdot I_H(t) \quad (2)$$

onde P_{fv} é a potência nominal dos módulos fotovoltaicos, em W ; I_{ref} é a intensidade de referência, em W/m^2 , PR é a razão de performance do sistema, adimensional, e $I_H(t)$ é a irradiação média global horizontal, em W/m^2 . Nessa abordagem, foi considerado que os módulos estão em uma posição aproximadamente horizontal, o que é coerente, dada sua posição no dirigível.

3.2 Energia consumida para vencer o vento

A energia consumida ao longo do tempo para vencer o arrasto dE_v/dt é dada por (adaptado de Khoury, 2012):

$$\frac{dE_v}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_d \cdot Vol^{\frac{2}{3}}}{\eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{bat}} \cdot V_w^3(t) \quad (3)$$

onde ρ é a densidade do ar, em kg/m^3 , C_d é o coeficiente de arrasto do dirigível, adimensional; Vol é o volume do dirigível, em m^3 ; η_h é a eficiência do hélice, adimensional; η_m é a eficiência do motor, adimensional, η_{esc} é a eficiência do controlador de velocidade, adimensional; η_{bat} é a eficiência de armazenamento da bateria, adimensional e $V_w(t)$ é a velocidade do vento na altitude desejada.

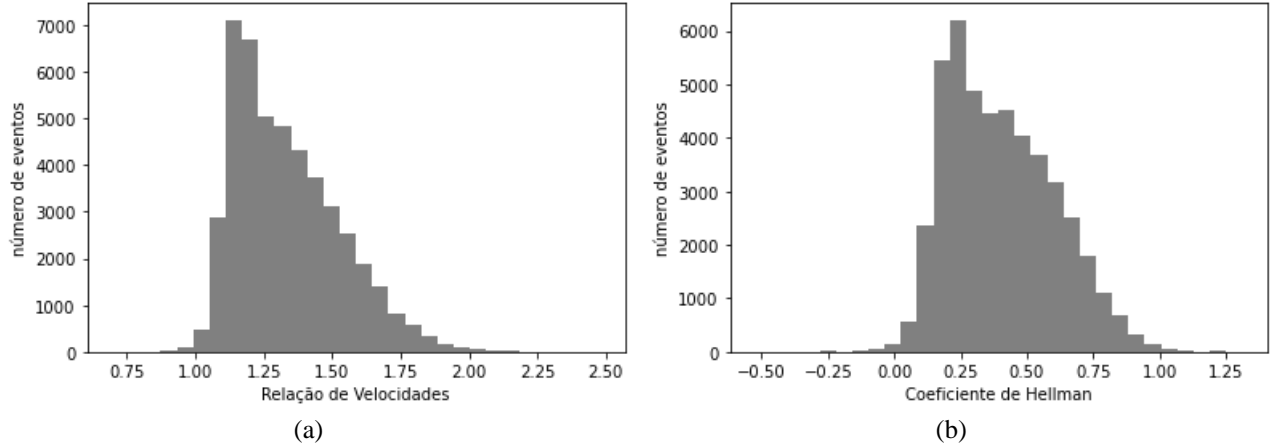


Figura 8 – (a) Relação de velocidades e (b) coeficiente de Hellman para a estação de Petrolina.

3.3 Energia consumida pelos componentes eletrônicos

A energia consumida pelos componentes eletrônicos ao longo do tempo dE_{el}/dt é dada por:

$$\frac{dE_{el}}{dt} = \frac{1}{\eta_{bat}} \cdot Pot(t) \quad (4)$$

onde η_{bat} é a eficiência de armazenamento na bateria e $Pot(t)$ é o consumo dos componentes eletrônicos em cada instante t .

3.4 Balanço de Energia do Sistema

A variação da energia das baterias com o tempo dE_{bat}/dt é obtida pela combinação das equações (2), (3) e (4):

$$\frac{dE_{bat}}{dt} = \frac{dE_g}{dt} - \frac{dE_v}{dt} - \frac{dE_{el}}{dt} = \frac{P_{fv}}{I_{ref}} \cdot PR \cdot I_H(t) - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_d \cdot Vol^{\frac{2}{3}}}{\eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{bat}} \cdot V_w^3(t) - \frac{1}{\eta_{bat}} \cdot Pot(t) \quad (5)$$

Contudo, quando a bateria está em sua capacidade máxima, ela deixa de armazenar energia ($dE_{bat}/dt = 0$). Desse modo, a equação em questão deve ser reescrita como:

$$\frac{dE_{bat}(t)}{dt} = \begin{cases} P_{fv} \cdot PR \cdot \frac{I_H(t)}{I_{ref}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_d \cdot Vol^{\frac{2}{3}}}{\eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_{esc} \cdot \eta_{bat}} \cdot V_w^3(t) - \frac{1}{\eta_{bat}} \cdot Pot(t) & E_{bat}(t) < E_{bat,max} \\ 0 & E_{bat}(t) \geq E_{bat,max} \end{cases} \quad (6)$$

3.5 Resultados do modelo para uma configuração de referência

O modelo proposto foi aplicado a um dirigível com a seguinte configuração: $Vol = 17 m^3$, $Pot = 3 W$, $I_{ref} = 1000 W/m^2$, $PR = 0,80$, $\rho = 1,2 kg/m^3$, $C_d = 0,03$, $\eta_h = 0,70$, $\eta_m = 0,80$, $\eta_{esc} = 0,90$, $\eta_{bat} = 0,90$, $E_{bat,max} = 950 W \cdot h$. Para correção da velocidade do vento em relação à altitude, foi considerado $h = 15 m$ e $\alpha = 0,25$. Para os dados de irradiação solar e velocidade do vento, foram utilizados os dados do INPE de diferentes estações.

Estão apresentados a seguir, de forma ilustrativa, os dados referentes à estação de Petrolina, ano 2010. Os valores estão apresentados na Figura 9 a, b, c para o dia 08 de junho, em hora UTC, e na Figura 9c para o mês de junho. Na Figura 9a, é apresentada a velocidade do vento ao longo do dia e na Figura 9b é apresentada a irradiação solar ao longo do dia. Pode-se observar que há certa variação na velocidade do vento ao longo do dia e, nesse caso, também da irradiação solar.

Esses dados de velocidade do vento são aplicados na equação (1) para correção de altitude e na equação (6) para obter a evolução da energia das baterias ao longo do dia. Essa evolução está apresentada na Figura 9c. Pode-se observar que a energia da bateria diminui à noite com o consumo de energia pelo dirigível para manter a posição. Essa energia é recarregada ao longo do dia, especialmente a partir de 10 h UTC, quando a irradiação começa a aumentar. Quando a energia armazenada nas baterias atinge o valor máximo, o carregamento para e a energia das baterias se mantém estável no valor máximo. A Figura 9d apresenta a evolução da energia armazenada nas baterias ao longo do mês de junho. Em uma sequência de dias nublados e com muito vento, como ocorre nos primeiros dias do mês de junho, a energia armazenada diminui de forma significativa.

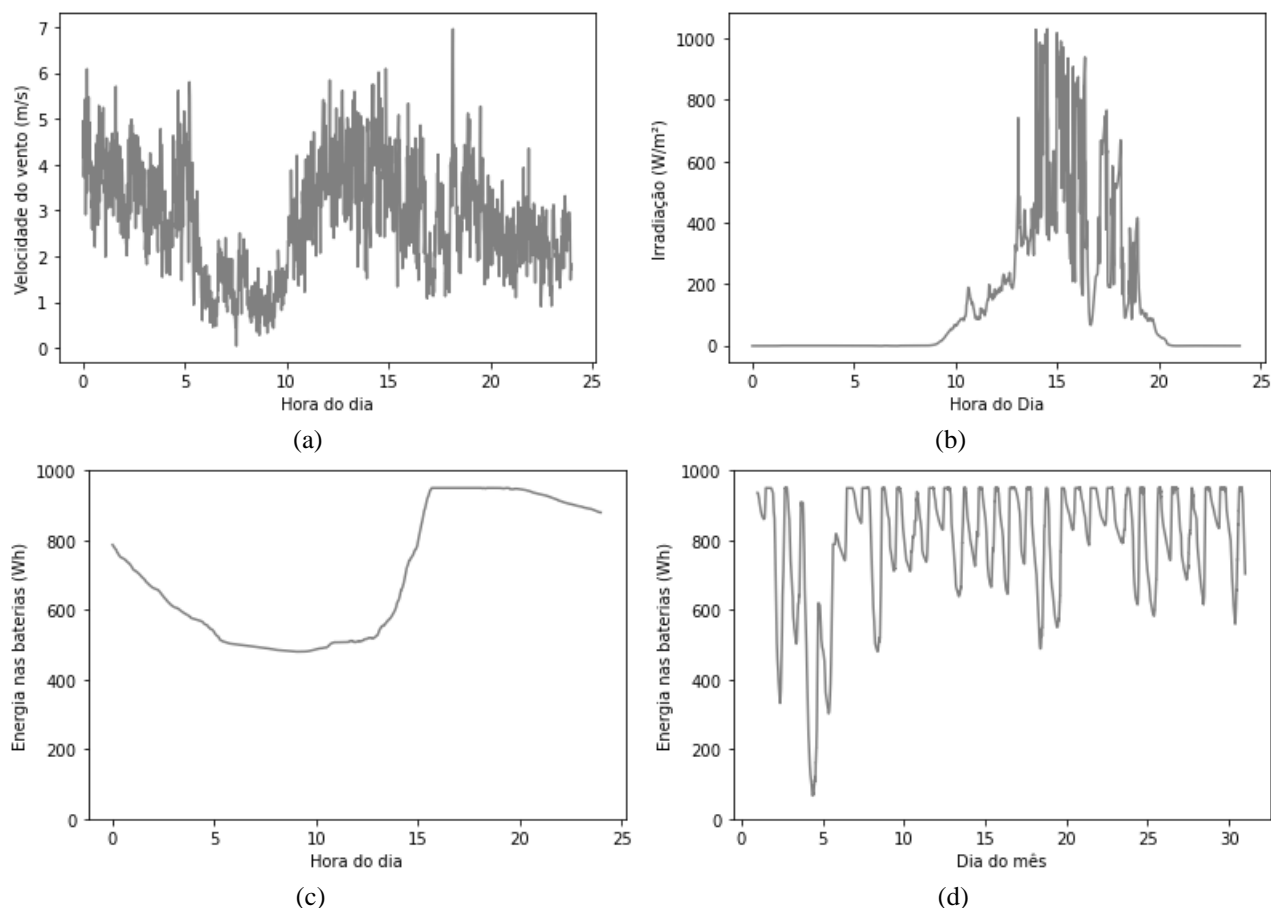


Figura 9 – (a) Velocidade do vento, (b) irradiação solar e (c) energia nas baterias ao longo do dia 08 de junho. (d) Energia da bateria ao longo do mês de junho.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Foram realizadas algumas atividades experimentais, apresentadas a seguir. Tais atividades tiveram como objetivo avaliar de forma experimental os principais aspectos da análise teórica realizada. A primeira delas foi o levantamento da curva IxV dos módulos selecionados. A seguir, foi avaliado o consumo dos componentes eletrônicos propostos. Finalmente, foram realizados testes de voo com o dirigível.

4.1 Levantamento da curva IxV do módulo fotovoltaico

Um dos primeiros testes realizados foi a avaliação de geração dos módulos fotovoltaicos selecionados. Para tal, foi traçada a curva IxV utilizando o aparato apresentado na Figura 10. Essa curva foi traçada conectando o módulo FV1 de 100 Wp a um capacitor C1 de 6800 μF , através de um resistor R1 de 0,10 Ω em série. Um osciloscópio foi utilizado para aquisição dos dados experimentais de tensão V1 e V2.

Foram obtidos dois conjuntos de dados de tensão, um correspondente à tensão do módulo durante o teste (V2) e outro correspondente à corrente do módulo durante o teste (V1). A corrente foi calculada dividindo queda de tensão V1 no resistor R1 pelo valor de R1 e a potência foi calculada multiplicando a corrente pela tensão. A seguir, foi traçada a curva IxV dos módulos, com a corrente e a potência calculadas em função da tensão. Essa curva está apresentada na Figura 11a para um teste realizado no dia 24/04/2021 às 13:54, no Rio de Janeiro.

Utilizando dados do INMET (INMET, 2021), estação Vila Militar (A621), a radiação recebida nessa hora foi de 2.636 J, o que corresponde a uma potência média de 732 W nessa hora e a temperatura ambiente estava entre 26,7°C e

28,2°C. Considerando o valor médio de 27,5°C, a temperatura NOCT de 45°C do módulo e a irradiância de 732 W, tem-se uma temperatura estimada da célula de 42,1°C. Desse modo, pode-se estimar uma perda de 21,1% por aquecimento em relação à potência STC e uma geração 26,8% inferior à nominal por causa da irradiância inferior. Desse modo, a geração estimada para o módulo seria de aproximadamente 56,5 W. O valor obtido foi de aproximadamente 51,1 W. Essa diferença de cerca de 9,6% é superior à tolerância de $\pm 3\%$ indicada pelo fabricante, mas pode estar associada a limitações do experimento, desvios do espectro-padrão e obstáculos à irradiação difusa.

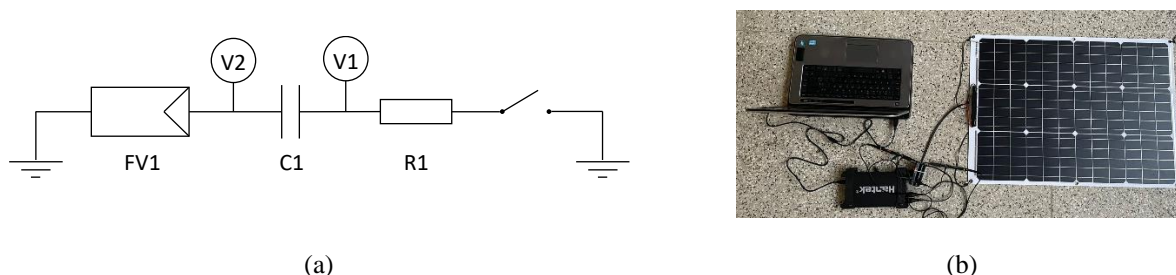


Figura 10 – (a) Esquemático e (b) Foto ilustrativa do aparato utilizado para traçar a curva IxV.

4.2 Avaliação do consumo dos componentes eletrônicos

Outro teste realizado foi a avaliação de consumo dos componentes eletrônicos. Para tal, os componentes foram mantidos ligados por aproximadamente 3h e foi realizada a medição da tensão da bateria em função do tempo para verificar a estabilidade do consumo (Figura 11b). Pode-se observar que o consumo dos componentes eletrônicos se comporta de maneira aproximadamente uniforme ao longo do tempo.

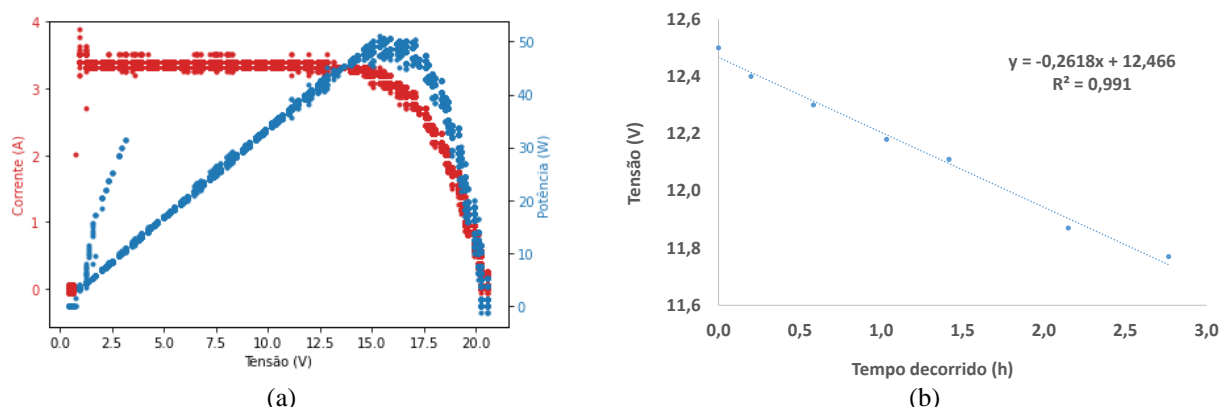


Figura 11 – (a) Curva IxV do módulo em avaliação e (b) teste de consumo dos componentes eletrônicos ao longo do tempo.

Ao final desse período, a bateria foi recarregada e foi medida a carga necessária para recarregá-la utilizando seu carregador. Foram necessários 515 mAh. Considerando uma tensão média de 12,2 V, o consumo dos componentes eletrônicos foi obtido multiplicando a carga pela tensão média e obtendo uma energia igual a 6,28 Wh em 2,77 h. O valor obtido foi dividido pelo tempo de descarga e foi obtida uma estimativa da potência média dos componentes eletrônicos igual a 2,27 W. Esse valor está cerca de 25% abaixo do valor considerado no item 3.5, de modo que há uma pequena margem de segurança em relação ao valor considerado nas simulações.

4.3 Teste de voo com o dirigível

Um terceiro teste foi a análise de comportamento em voo do dirigível construído. Para tal, foi construído um dirigível de 4,5 m de comprimento, 1,1 m de diâmetro máximo e volume interno de 3,0 m³. Essa configuração é baseada na configuração proposta pelo National Physics Laboratory (Khoury, 2012), que possui baixo arrasto e bom desempenho dinâmico. Esse dirigível é propulsionado através de duas hélices de 254 mm posicionadas na gôndola. O dirigível possui ainda dois lemes para direcionamento e dois profundores.

A Figura 12 apresenta uma imagem desse teste. O voo foi realizado na Base Aérea de Campos dos Afonsos e demonstrou a capacidade de deslocamento do dirigível, de direcionamento e de manutenção de posição. Nesse teste, o dirigível foi controlado remotamente e realizou três voos em um tempo total de aproximadamente 2 horas.

5 CONCLUSÃO

Com base nos testes realizados, pode-se observar que a proposta apresentada de utilização de um Dirigível Solar de Elevada Autonomia, como o Zefiro, para inspeção e monitoramento de áreas extensas é uma proposta viável. Essa proposta apresenta diversas vantagens, particularmente para inspeção e monitoramento de usinas eólicas e fotovoltaicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj) pelo financiamento do presente projeto.



Figura 12 – Teste de voo do dirigível Zefiro.

REFERÊNCIAS

- Bents, D. J., 2011. Long-Duration Low- to Medium-Altitude Solar Electric Airship Concept. NASA/TM—2011-216815.
- Carvalho, J. R. H., Rueda, M. A. C., Azinheira, J. R., Moutinho, A., Mirisola, L. G. B., Payva, E. C., Nogueira, L. A. C. O., Fonseca, G. A., Ramos, J. G., Koyama, M. F., Bueno, S. S., Amaral, C., 2021. System Architecture of a Robotic Airship. In Smart Innovation, Systems and Technologies 198. Springer.
- Colozza, A., 2003. Initial Feasibility Assessment of a High Altitude Long Endurance Airship. NASA/CR—2003-212724.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Elfes, A., Bueno, S. S., Bergman, M., Ramos, J. J. G. A Semi-Autonomous Robotic Airship for Environmental Monitoring Missions. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation. Leuven, Belgium. May, 1998.
- INMET, 2021. INMET – Portal. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>.
- INMET, 2022. INMET – Mapa de Estações. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>.
- INPE, 2021. SONDA: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>. Acesso em 17/12/2021.
- Martins, L. Z. R., 2017. Geração Centralizada de Energia Solar Fotovoltaica e Desenvolvimento Local: Estudo de Caso da Usina de Pirapora.
- Khoury, G. A. 2012. Airship Technology. Cambridge University Press.
- Kroplin, B., Schafer, I. 1995. Experiences by Design and Operation of the Solar Powered Airships “Lotte 1 – 3”. AIAA-95-1613-CP.
- Vaeth, J. G. Airships – Basis for a New Oceanic Capability. National Environmental Satellite Service and National Oceanic and Atmospheric Administration, 2006.
- Zhang, L. Li, J., Jiang, Y. Du, H., Zhu, W., Lv, M., 2020. Stratospheric airship endurance strategy analysis based on energy Optimization. Aerospace Science and Technology.

ZEFIRO PROJECT: PROPOSAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A HIGH AUTONOMY SOLAR AIRSHIP FOR FOTOVOLTAIC AND EOLIC POWER PLANTS MONITORING

Abstract. Monitoring and inspection of wind and photovoltaic power plants is a major challenge for companies in the electricity sector, especially during their construction. The extension of these facilities makes large displacements necessary. The Zefiro project is developing a solar airship with high autonomy to be used to carry out these operations. This airship will be able to monitor the construction or operation of plants continuously and autonomously for several days. Within this project, several activities, both theoretical and experimental, have been developed. A survey of meteorological data was carried out using the INPE and INMET databases. Based on these values, the energy generation and consumption of the airship under these conditions was modeled. Such modeling indicated the feasibility of the proposal. Additionally, experimental tests were carried out to validate the theoretical model developed and to evaluate the airship configuration and manufacturing processes.

Key words: Drones, Monitoring, Inspection.