

Diseño e implementación de un sistema de captación, almacenamiento, distribución y supervisión de energía para un dirigible autosustentado (Prototipo 2 PGA)

Guillermo Miguel Torretagle Albán, Marco Benalcázar, Leonardo Basile

Departamento de Física, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

leonardo.basile@epn.edu.ec

Resumen

Se realiza el diseño e implementación de un sistema de energía que capta 2.8 kW de energía solar, la cual es almacenada en baterías de alta densidad de energía con capacidad de proveer hasta 5.4 kW/h y se distribuye a todos los dispositivos eléctricos y electrónicos del dirigible a través de elementos de conmutación y reguladores de voltaje controlados por un sistema microprocesado. El sistema permite controlar el flujo de energía desde un computador remoto a través de una conexión Ethernet, así como supervisar y registrar el comportamiento de las variables de interés como voltaje, corriente, potencia, temperatura de varias secciones del sistema.

Abstract

It develops the design and implementation of a energy system which catch 2.8 kW of solar energy. This energy is stored in high energy density batteries, which can provide 5.4 kW/h, and supply all of the electric and electronic devices in the ship. It is done through switching devices and voltage converters controlled by a system with a micro-processor. The system allows to control the energy flow from a remote computer through an Ethernet connection. It also allows to supervise and register important variables behavior like voltage, current, power and temperature in many sections of the system.

1 Introducción

El dirigible en desarrollo tiene por objetivo realizar operaciones de comunicaciones, monitoreo con cámaras, vuelos autónomos, etc. Por todo esto, existe gran cantidad de dispositivos eléctricos y electrónicos a bordo, entre ellos motores eléctricos de propulsión trifásicos, servomotores para control de planos de vuelo, computadores, dispositivos de comunicación. Se plantea que estos dispositivos sean sustentados eléctricamente por medio de energía solar, de donde parte todo el sistema de distribución de energía. Se considera la necesidad de altos rendimientos de todos los dispositivos necesarios para efectuar las conversiones de energía así como su bajo peso y poco volumen.

Se efectúa un diseño mecánico de la estructura y cableado así como su implementación para ubicar todos los elementos involucrados en el sistema de energía, acoplándose a las dimensiones físicas permitidas por las demás áreas de diseño.

2 Desarrollo, pruebas e integración de hardware

2.1 Sistema Fotovoltáico

Los cálculos y diseño del sistema fotovoltaico parten del consumo de los elementos eléctricos y electrónicos que funcionarán en la nave, el tiempo de autonomía deseado, el área y peso disponible en la nave. Se determina que las cargas que más impactan en cuanto al consumo de energía son los motores de propulsión, cuyo consumo se determinó de hasta 6.8 kW máximo, siendo su alimentación de 48 V y llegando a registrar hasta 150 A en varias pruebas de funcionamiento.

Los paneles solares utilizados son de Silicio amorfo, los cuales tienen una característica especial que es su fle-

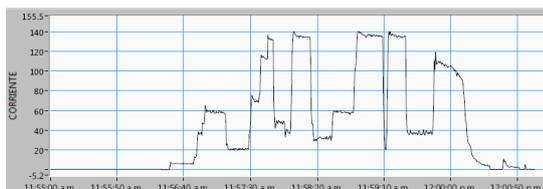


Figura 1. Curva de corriente para el motor Hacker A-150.

xibilidad y bajo peso, en relación a los de silicio monocristalino y policristalino. Se usa esta propiedad de ser flexible para poder ubicar los paneles solares sobre la envoltura de la nave y que se adapten a la forma de la misma.

Con los datos de consumo de energía de los motores de propulsión, se coordina con las demás áreas para definir un tiempo de autonomía estimado y según el tamaño de la nave, se exige la disponibilidad de 105 m² sobre la envoltura de la nave para ubicar 15 mantas de paneles solares y la capacidad de la nave para levantarlos (108 kg).

Se realiza el armado y pruebas de funcionamiento de los paneles solares en tierra, confirmando las potencias y voltajes requeridos por los dispositivos en la nave.



Figura 2. Implementación y pruebas de sistema fotovoltaico en tierra.

De esta forma, se consideran 3 grupos de paneles solares, los cuales se distribuyen de la siguiente manera:

Grupo A: 8 mantas de paneles solares, 1520 W, 30VDC para carga de baterías de motores de propulsión.

Grupo B: 6 mantas de paneles solares, 1140 W, 30VDC para carga de baterías de elementos de control electrónico, equipos de comunicaciones.

Grupo C: 1 manta de paneles solares, 190 W, 15.4VDC para control de energía y supervisión.

Otra consideración a tener en cuenta con el uso de paneles solares, es su calentamiento, lo cual en este caso afecta la temperatura de la envoltura y por ende el gas que está dentro de la nave. En un día soleado se obtuvo la curva que se observa en la Figura 3.

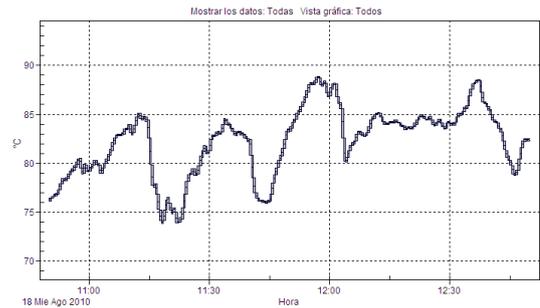


Figura 3.

Como se muestra en el gráfico, la temperatura en la capa inferior de los paneles solares llega a alcanzar los 89 °C, por lo cual, en las otras áreas se considera el uso de un aislante térmico entre la envoltura de la nave y los paneles solares.

2.2 Almacenamiento de energía

Para almacenar la energía solar, se deben usar baterías de algún tipo. Se determinan que las que están al alcance de la tecnología, son livianas y pueden almacenar gran cantidad de energía son las de tipo LiPo, usadas ampliamente en aeromodelismo.



Figura 4. Batería LiPo.

Estas baterías se caracterizan por su alta densidad de energía, pero a la vez su delicado tratamiento en cuanto a condiciones de uso, almacenamiento, carga y descarga, ya que tienen la característica de ser fácilmente inflamables en caso de no ser tratadas adecuadamente.

Debido a sus características especiales, se realiza un análisis especial de éstas baterías, por lo cual se caracteriza sus curvas de carga y descarga, se investiga las temperaturas de operación, y controles necesarios para evitar su destrucción y la de otros elementos, así como alargar su vida útil.

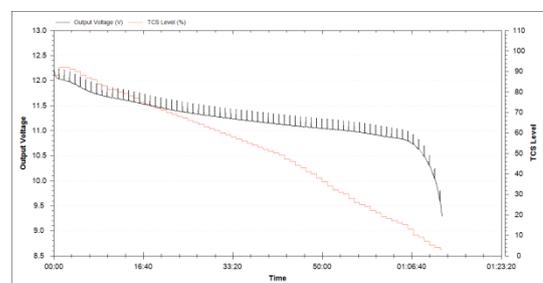


Figura 5. Curva de descarga de una batería LiPo de 11.1 V

En la curva de descarga de una batería Lipo que se observa en la figura anterior, el voltaje cae abruptamente cuando está cerca del 15 % de su capacidad, dato clave al momento de supervisar el estado de carga de las baterías, previniendo un estado crítico en niveles de energía disponibles.

Se hizo necesario efectuar pruebas destructivas de las baterías tipo LiPo, registrando datos que permitan predecir y prevenir la destrucción de las mismas en funcionamiento.

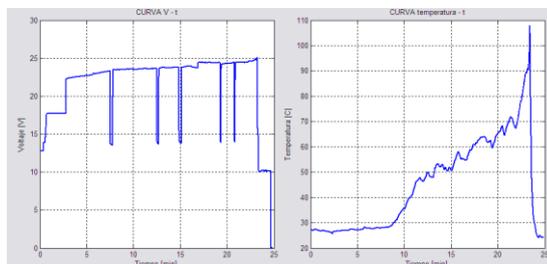


Figura 6. Curvas de voltaje y temperatura durante la destrucción de una batería LiPo.

De las pruebas realizadas, se determinó que la hinchazón, así como el incremento de temperatura de la batería son factores sumamente importantes para advertir la posible explosión de la misma.



Figura 7. Hinchazón y explosión de una batería LiPo.

De la misma manera, como resultado de investigación y pruebas se determinó que la hinchazón de las celdas que conforman la batería LiPo se produce cuando existe un desbalanceo de voltaje entre las mismas. Todas las celdas de una batería deben tener el mismo voltaje con una variación de ± 30 mV, caso contrario, se produce la hinchazón en relación directa al desbalance.

En estas baterías, resulta de sumo cuidado el mantener las celdas entre los límites de voltaje definidos, los cuales son 3.0 V mínimo y 4.2 V máximo para la mayoría de los fabricantes.

Con todas estas consideraciones, se diseñan los bancos de baterías. Se supervisan los valores de voltaje de cada banco de baterías, se considera un espacio de separación entre baterías por la posible hinchazón, se decide ubicar sensores de temperatura en los bancos y se plantea la opción de instalar celdas de carga para detectar la deformación de las baterías. Toda esta información llega al sistema microprocesado y notifica al usuario de cualquier anomalía.

Se arman bancos de baterías para cada motor de propulsión, para los dispositivos electrónicos y para el con-

trol del sistema de energía, cada conjunto de baterías con su banco de respaldo.

La recarga de estas baterías en el sistema de energía se realiza sin controlar el balanceo de cada una de las celdas, ya que si consideramos que se está usando alrededor de 70 baterías de 6 celdas, resultaría una circuitería de balanceo para 420 celdas, que incrementaría considerablemente el volumen y complejidad del sistema de energía. Debido a esto, se recomienda realizar una carga balanceada cada vez que la nave se encuentre en tierra, para de esta forma evitar la hinchazón de las mismas y alargar su vida útil.

2.3 Sistema de Control

El sistema de control del sistema de energía implementado cumple con el esquema de la Figura 8:

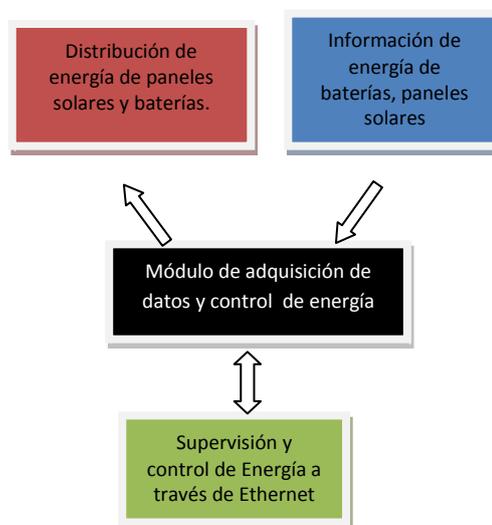


Figura 8. Hinchazón y explosión de una batería LiPo.

El núcleo del control del sistema lo constituyen 5 microcontroladores dsPIC33FJ128MC804. Se optó por este tipo de control, más no PLCs o FPGAs, debido a que se debe cumplir con poco peso y poco volumen de los dispositivos. El modelo del microcontrolador fue escogido por las siguientes características:

- Funcionamiento del procesador a 80Mhz.
- Puerto de comunicación I2C.
- 2 puertos de comunicación serial.
- 128Kbytes de memoria flash y 4Kb de memoria RAM.
- 9 conversores analógico/digitales de 12 bits.
- Hasta 35 pines de entrada/salida.

De esta forma el microcontrolador principal, adquiere las señales de voltaje, corriente y temperatura de los

bancos de baterías y arreglos de paneles solares (43 variables análogas). Se controlan los elementos de conmutación (relés) que enrutan el flujo de energía de los paneles solares, de los bancos de baterías y reguladores de voltaje hacia los dispositivos electrónicos presentes en la nave.

El sistema cuenta con programación que protege a los paneles solares de entregar una excesiva corriente, protege a las baterías de llegar a un voltaje demasiado bajo o demasiado alto, así como de llegar a una temperatura demasiado alta. Todos estos parámetros son configurables desde el software de supervisión, y para mantener estos parámetros aunque se quede sin alimentación de energía, se instala una memoria no volátil que contiene dicha información y que el microcontrolador principal lee en el momento del arranque.

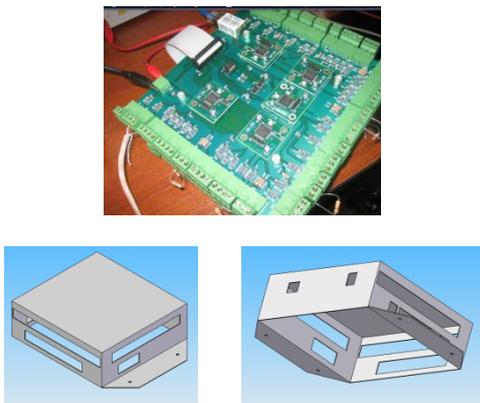


Figura 9. Hardware y caja del sistema de control de energía.

2.3.1 Instrumentación utilizada.

Para la adquisición de las variables de voltaje, se usa divisores de tensión usando resistencias de precisión con una tolerancia del 0.1% con un coeficiente térmico de $\pm 25 \text{ppm}/^\circ\text{C}$.

La adquisición de las señales de corriente se las realiza con sensores de tipo efecto Hall, los cuales pueden medir corriente alterna y en este caso los únicos que pueden medir corriente continua sin ubicar ningún elemento físico que interrumpa la circulación de la corriente a través del cable.



Figura 10. Sensores de corriente de tipo efecto Hall.

Los sensores de temperatura usados son termistores del tipo NTC, escogidos por su gran estabilidad, calidad y bajo costo. En el software de monitoreo se caracterizó la curva exponencial de resistencia en función de la

temperatura que presentan este tipo de sensores y de esa forma se pudo medir temperaturas entre los -5°C y 100°C .

2.4 Pruebas de bajas temperaturas

Debido a que la nave puede estar sometida a bajas temperaturas al llegar a una elevada altitud, bajo ciertas circunstancias, los componentes eléctricos y electrónicos también estarán sometidos a esas temperaturas. Para verificar el correcto funcionamiento del sistema de control de energía sometido a esas condiciones ambientales, se efectúa una simulación en tierra ubicando los equipos en una cámara de bajas temperaturas desarrollada en el área de Ciencias de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 11. Cámara de bajas temperaturas con elementos del sistema de control de energía en su interior.

En la cámara se ingresa el módulo de Adquisición y Control de Energía, una batería LiPo de 22.2 V 5 Ah y un relé de alta potencia, utilizado para energizar los motores de propulsión. Se somete a estos elementos a una temperatura de hasta -3°C y se monitorea el sistema desde fuera de la cámara, registrando los datos de voltaje y corriente de la batería, así como manipulando la conmutación del relé.



Figura 12. Curva de temperatura del sistema de energía durante la prueba en la cámara de bajas temperaturas.

Los elementos respondieron adecuadamente, sin sufrir inconveniente alguno en la batería, sistema microprocesado, relé y sensor de temperatura.

3 Desarrollo de software de supervisión

El sistema de energía de la nave involucra gran cantidad de información en cuanto a variables eléctricas y de temperatura. Se presenta la necesidad de supervisar el

voltaje y corriente de los paneles solares, bancos de baterías, cargas eléctricas, así como la temperatura en bancos de baterías.

Por medio de comunicaciones TCP/IP con un protocolo propietario, se extrae información del Módulo de Adquisición de datos y control de Energía que está instalado en la nave, y se procesa en el Software de Supervisión de Energía. Esta información ayuda a un operador a tomar decisiones que involucren el control de energía e interactuar con los demás operadores durante los vuelos de la nave.



Figura 13. Pantalla principal del software de Supervisión de Energía.

Además de poder visualizar las variables de importancia del sistema, se puede cambiar el modo de funcionamiento entre Manual y Automático, pudiendo un operador controlar todo el flujo de energía cuando se encuentra en control manual. Se generan señales audibles en caso de detectar niveles críticos de cada variable y se muestra un gráfico en tiempo de real de hasta 2 variables que se seleccionen para visualizar.

Otra característica de importancia a tomar en cuenta en el monitoreo del sistema de energía es que se debe guardar históricos de las variables medidas. Se guarda la información adquirida durante un vuelo para su posterior análisis y relación con los datos adquiridos por las otras áreas como el consumo de energía de los equipos, motores, duración real de baterías, etcétera.

4 Diseño e implementación de estructura metálica para soporte de los elementos del sistema de energía

Para poder subir el sistema de energía en la nave, se necesita una estructura en la que se puedan ubicar cada uno de los elementos que constituyen el sistema, además del cableado necesario.

Se diseña la estructura con todos sus elementos y cables usando un software de Diseño Asistido por Computadora, para luego proceder con la fabricación de la mis-

ma e instalación de los elementos que componen el sistema de energía, en este caso los Relés, convertidores DC/DC, baterías, sensores de corriente, módulo de Adquisición de Datos y Control de Energía, barras de cobre, conectores.

Las dimensiones de la estructura y ubicación de los elementos en la misma, se determinan en conjunto con el área de mecánica que diseña la nave. De esta forma se ajustan las dimensiones para que la estructura quepa en la góndola de la nave y que los elementos de otras áreas puedan acomodarse en conjunto con el sistema de energía.

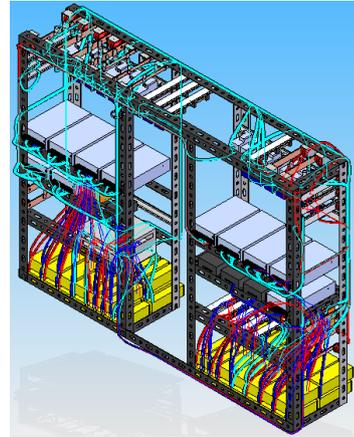


Figura 14. Diseño de la estructura del sistema de energía para instalar en la góndola de la nave.

Una vez avanzado el diseño, se empieza la construcción de la estructura y la ubicación de los elementos, así como el cableado y disposición de barras de energía para la conexión de los dispositivos de la nave.



Figura 15. Estructura del sistema de energía para instalar en la góndola de la nave.

En el cableado del sistema de energía, fue de gran utilidad el uso de cables usados en sistemas de audio de alta potencia para automóviles. En este tipo de conductores, existen cables relativamente delgados y sumamente flexibles que permiten la circulación de altas corrientes, que con cable de tipo industrial, resultarían inmanejables para este tipo de aplicaciones por su rigidez y peso excesivo. Las marcas usadas fueron Stinger y Bluewave.

5 Pruebas y resultados

Las pruebas del sistema de energía se llevan a cabo en la ciudad de Ambato en el aeropuerto de Chachoán en las instalaciones del CIDFAE.

Se efectúa la instalación del software de Supervisión de Energía en uno de los servidores ubicado en el Shelter de la FAE, el cual cuenta con los elementos para establecer comunicación Ethernet inalámbrica con el radio-modem usado para comunicarse con los elementos en la góndola de la nave.



Figura 16. Software de Supervisión de Energía instalado en el Shelter.

Se realizan todas las conexiones del sistema de energía, incluyendo los paneles solares y bancos de baterías. Se conectan algunas de las principales cargas a alimentar como son el motor de propulsión, motor para Ballonets, servomotores del basculante, micropiloto y dispositivos de comunicación por radiofrecuencia.



Figura 17. Funcionamiento integrado del sistema de Energía en las instalaciones del CIDFAE.

El sistema de Energía fue supervisado y controlado desde el Shelter a través de la red de comunicación establecida por el área de Telecomunicaciones del proyecto.

Los paneles solares entregaban la potencia que se les exigía y no hubo inconvenientes al poner los dispositivos en funcionamiento. Las fuentes de energía para cada dispositivo se mantenían entregando el voltaje requerido con un error máximo del 4 %.

El motor de propulsión Hacker A-150 de 6.5 kW funcionó correctamente, llegando a girar hasta el 50 % de su capacidad de velocidad. El conjunto de servomotores que controlan el movimiento del basculante tuvieron una mejor respuesta que con las baterías de plomo con las que comúnmente se los hacía funcionar. El motor de ballonets fue sometido al 100 % de su capacidad, sin presentar ningún problema, y los sistemas del micropiloto y comunicaciones funcionaron adecuadamente.

6 Conclusiones

El uso de la energía solar una nave tipo dirigible, impulsada por motores eléctricos, es aplicable si la nave será de un tamaño sumamente grande (mayor a los 100 metros de longitud), ya que de otra forma, los paneles solares de silicio amorfo llegarán a pesar tanto que una nave pequeña no podrá levantarlos. Esto debido a que los paneles de silicio amorfo tienen apenas un 11 % de rendimiento, que exige gran cantidad de paneles solares para obtener magnitudes de energía considerables.

Las baterías tipo LiPo funcionan adecuadamente para este tipo de aplicaciones en las que prima el bajo peso y poco volumen. Pero el sistema de control y supervisión de las mismas se vuelve complejo debido a la facilidad de explotar al ser sometidas a condiciones como desbalanceo de celdas, sobrecarga, o descarga profunda, lo cual incrementa el volumen en la circuitería y elementos de protección.

Los sensores de efecto Hall presentan un comportamiento sumamente preciso en las mediciones de corriente continua y evitan el método tradicional de ubicar una resistencia de potencia en serie con el circuito en el que se desea medir la corriente, en el cual muchas veces se presenta ruido y desperdicio de energía.

Realizar un diseño mecánico con la ayuda de software tipo CAD (Diseño Asistido por Computadora), permite ahorrar mucho tiempo en la etapa de manufactura, y compra de elementos para el proyecto, ya que además de calcular pesos estimados, y entregar dimensiones exactas para la construcción, permite obtener reportes del tipo y cantidad de elementos utilizados, así como los metros de cable de los distintos calibres utilizados en el harness construido.

El uso de cables para sistemas de potencia de audio resulta exitoso en aplicaciones en las que se requiera de bajo peso y volumen, así como flexibilidad de los mismos para manejar altas corrientes. Pero hay que tener mucho cuidado en el ambiente en el que se colocan este tipo de conductores, ya que para ganar en flexibilidad, las chquetas o protecciones aislantes del cobre son relativamente delicadas, ya que se verificó que se cortan fácilmente y se derriten al ser sometidos a alta temperatura.

Es de suma importancia considerar que en el diseño de una aeronave, los elementos o dispositivos electrónicos que intervengan en el funcionamiento, deben ser en lo posible de un voltaje estándar, como por ejemplo 28V DC, ampliamente utilizado en la aviación. De esta forma se evita la instalación de convertidores de voltaje por cada dispositivo que utilice un voltaje diferente, ahorrando gran cantidad de peso y volumen.

Referencias

- [1] Leonardo Basile, Wilson Merino, Octavio Guijarro, Miguel Torretagle, Marco Benalcázar, *Comunicación Privada*, 2011.