

## Revisión del estado del arte de la aviónica en aeronaves comerciales

Guerrero Rodríguez<sup>1</sup>, Ángel Flores Abad<sup>1</sup>, Manuel Nandayapa<sup>1</sup>,  
Ángel Israel Soto Marrufo<sup>1</sup> Osylan Osiris Vergara Villegas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

### Resumen

La aviónica es una sub área de la aeronáutica con gran crecimiento. Se invierten enormes cantidades de esfuerzo en mejorar los sistemas que se apoyan en esta, ya que están involucrados en la seguridad, desempeño e impacto ambiental de las aeronaves. Este trabajo inicia con un análisis de las principales funciones de la aviónica y los requisitos de diseño para sus sistemas. Después se presenta el estudio de un enfoque innovador para la implementación de un sistema relacionado con la aviónica.

**Palabras clave:** Aviónica, .

### Introducción

La aviónica es uno de los componentes de la aeronáutica con más investigación, debido a su importancia en la seguridad de pasajeros y aeronave, además es una tecnología que no solamente está involucrada en el desarrollo de aeronaves comerciales y militares, sino también en el de naves espaciales, cohetes y satélites, es decir en el campo aeroespacial. La aviónica puede entenderse como la aplicación de la electrónica en todos los sistemas de la aeronave, y está implicada prácticamente en todos los sistemas de control de la aeronave. El modelado de la dinámica del vuelo también es de vital importancia, ya que permite obtener un mejor entendimiento de las fuerzas que afectan a los objetos en vuelo, además de desarrollar mejores estrategias de control,

lo que permite incrementar el nivel de seguridad. La dinámica de vuelo, a pesar de no ser un componente en continuo cambio, sus herramientas si lo están, como por ejemplo los métodos de modelado e identificación y la simulación gracias a la creciente mejora de las computadoras. El presente trabajo trata de adentrarse en un área de la aeronáutica en específico. La aviónica, una de las más amplias. En este caso se pretende recopilar la información más actual para formar un documento integrador, que pueda ser utilizado como fuente de consulta para obtener una rápida idea de los esfuerzos realizados actualmente en este campo de la aeronáutica. Es difícil darse una idea general de los avances en áreas de la aeronáutica, ya que es una

ciencia en constante desarrollo y crecimiento, en especial la aviónica, ya que esta se apoya en otras ramas de la ingeniería que también cuentan con avances de manera frecuente, como la ingeniería electrónica y de control. Se necesita de bastante tiempo investigar el estado del arte en aeronáutica y aviónica,

y también encontrar fuentes confiables. El área de la automatización está directamente relacionada con la aviónica, en especial con los sistemas de seguridad y monitoreo, en donde son de utilidad el diagnóstico de fallas y control tolerante a las mismas.

## Aviónica

### 2.1 Funciones clave de la aviónica.

A continuación se realizará una descripción de las funciones principales de la aviónica, y se explicará la importancia de cada una de ellas.

#### 2.1.1 Grabación de datos

Es importante obtener información sobre eventos ocurridos con anterioridad para hacer análisis de los mismos y así evitar percances no favorables. Dentro de las variables que son grabadas para ser estudiadas posteriormente se tienen:

Aceleración

Velocidad angular

Vector de campo magnético

Altitud del vehículo aéreo respecto al horizonte

Velocidad relativa del aire

Temperatura

Presión ambiental

Humedad relativa

Velocidad de las ondas sonoras

Cargas mecánicas y vibraciones

Presión en cámaras de encendido

#### 2.1.1.1 Áreas de oportunidad

Además de las variables que requieren ser grabadas, se destaca la función que desempeña la caja negra en las aeronaves comerciales, ya que ayuda a determinar las razones por las cuales han ocurrido accidentes. Se está proponiendo aunque aún no con tanta fuerza, el que los aviones cuenten con un sistema de transmisión de datos en tiempo real de la caja negra [4], ya que se gastan demasiados recursos en la búsqueda de las mismas e incluso sin éxito. Este proyecto de rastreo de vuelo considera la factibilidad de transmitir información a estaciones en tierra, en vez de esperar los largos periodos de tiempo requeridos para encontrar las cajas negras. Por ejemplo, el proyecto de rastreo de vuelo plantea tener varios servidores en tierra, que almacenen información del vuelo cuando la aeronave pase por su perímetro establecido, como se muestra en la siguiente figura 1:

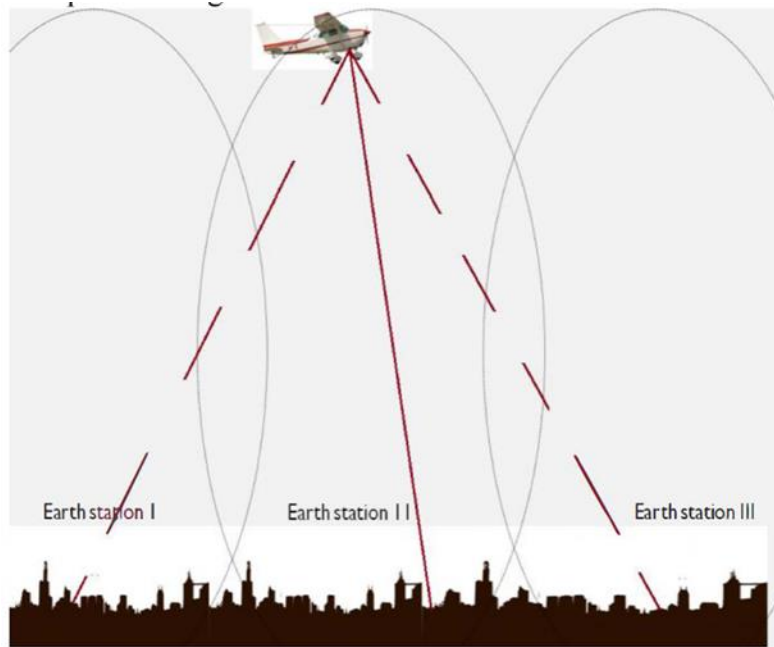


Figura 1 Configuración de las estaciones en tierra

### 2.1.2 Monitoreo, telemetría y sistemas de posicionamiento

Esta función consiste en verificar que las condiciones de la aeronave y los sistemas sean óptimas durante el vuelo además de alertar sobre mantenimientos preventivos, es una tarea muy importante ya que está directamente relacionada con la seguridad. Las sub funciones desempeñadas por el monitoreo son las siguientes:

Auto prueba

Monitoreo de sub sistemas

Identificación de fallas

Estado de las fuentes de potencia

Presión de los compartimentos

Temperatura en tableros

Consumo de energía

Exposición a la radiación (aeroespacial)

También la telemetría es importante ya que es la forma de mantener contacto con objetos alejados (más utilizado en cohetes en el área militar), la telemetría permite:

Realizar diagnósticos en tiempo real

Controlar remotamente

#### 2.1.2.1 Áreas de oportunidad

Ejemplo de la importancia del monitoreo lo encontramos en el diagnóstico de la condición del motor de la aeronave ya que la confiabilidad y la seguridad dependen de forma crítica del motor. Para la revisión de la condición del motor existen diversos tipos de sensores, sin embargo se requiere determinar cuál

información de entre todos los sensores colocados en la aeronave es relevante en determinados momentos, para esto, como se menciona en [5], existe un enfoque de selección de la información de los sensores basado en la entropía para el monitoreo y diagnóstico, el contar con una metodología establecida como esta, reduce la cantidad de procesamiento y mejora el desempeño y la efectividad de la operación de monitoreo.

### 2.1.3 Modelado, mecánica y control de vuelo

Cuando las computadoras ayudan al piloto a maniobrar la aeronave por medio de algoritmos de control, esto permite que el vuelo sea más estable y seguro. Las tareas que son realizadas gracias a esta función son:

Control de despegue

Control de altitud

Control de trayectoria

Abortar misiones

Esta función de la aeronáutica engloba el análisis en lazo abierto de la estabilidad de la aeronave, el sistema de control de vuelo, análisis y optimización del desempeño de la aeronave, fallas del sistema, análisis de fallas y análisis de daño al medio ambiente. La estabilidad de la aeronave consiste en la utilización de técnicas analíticas y experimentales para estudiar el movimiento natural de la aeronave. El reto consiste en determinar si bajo ciertas condiciones de vuelo todas las fuerzas y momentos están en

equilibrio. En consecuencia, se considera que la aeronave se encuentra en equilibrio si después de alguna perturbación de la condición de equilibrio, presenta una tendencia a regresar a la condición original. Las herramientas que se utilizan para este estudio son:

La identificación del sistema para obtener un modelo ya sea de forma analítica o empírica, estimación de los parámetros del modelo, pruebas en túnel de viento y pruebas de vuelo.

Modelación matemática. Ecuaciones de movimiento, aerodinámica, geometría, considerando errores e incertidumbre del modelo. Un ejemplo de enfoques nuevos en modelación es la utilización de vectores extendidos para el modelado aerodinámico seccional, como se presenta en la referencia [6], en la cual este análisis es aplicado a un vehículo aéreo no tripulado (UAV por sus siglas en inglés). Los vectores extendidos (también conocidos como vectores de seis dimensiones) reducen el número de operaciones algebraicas necesarias para obtener el modelo matemático de los sistemas dinámicos.

Análisis analítico de la estabilidad y márgenes de estabilidad. Se incluye un análisis de sensibilidad para determinar los factores físicos que más efecto tienen en la estabilidad de la aeronave.

Pruebas experimentales, para analizar la estabilidad y validar los modelos obtenidos.

### 2.1.3 Áreas de oportunidad

Las investigaciones actuales para encontrar el modelo de forma experimental en túnel de viento son importantes y están siendo utilizadas para analizar el comportamiento de la aeronave bajo condiciones de congelamiento [7]. El estudio del efecto del hielo es importante ya que la acumulación del mismo afecta el desempeño aerodinámico. Otra condición climática que afecta a la aerodinámica además de la seguridad de vuelo es la lluvia y está siendo actualmente investigada experimentalmente. Tanto en

modelos a escala como en modelos de tamaño real [8]. Otra área de oportunidad en la detección de fallas de la instrumentación de los sistemas de control, en específico en los sensores para el control de vuelo. Un ejemplo del tipo de técnicas bajo investigación es la aplicación de relaciones cinemáticas, para la detección y el aislamiento del componente ya sea sensor o actuador y cuyo funcionamiento se ha degradado [9]. La figura 2.2 ilustra los componentes que se necesita controlar durante el vuelo en una aeronave comercial:

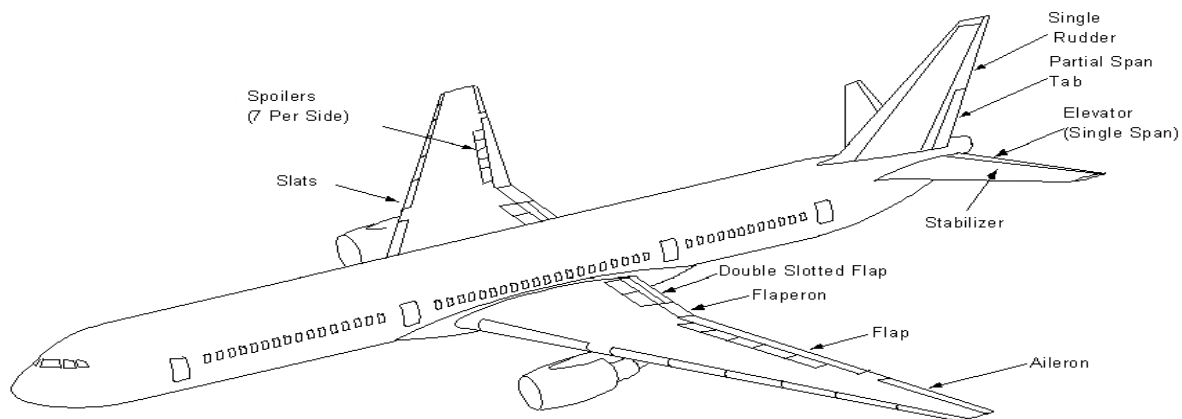


Figura 2 Boeing 777 y sus componentes mecánicos que requieren control

#### 2.1.4 Suministro de energía

Es una de las funciones más importantes de la aeronave, porque si falla el resto de los sistemas dejara de funcionar. Se pueden destacar sus funciones principales:

Fuente de energía

Paquetes de batería/celdas de combustible

Bus de potencia redundante

Control térmico

Generalmente, los sistemas son energizados por tres tipos de energía: neumática, hidráulica y eléctrica. Estos tipos de energía sin extraídos por fuentes primarias como los motores o la fuente auxiliar de energía (APU, por sus siglas

en inglés) [10]. Los requerimientos de potencia son mayores en aplicaciones que requieren energía neumática, por ejemplo el sistema de arranque de motor y el

sistema de protección anti hielo en las alas. La figura 3 ilustra la situación en términos de necesidad de energía en las aeronaves comerciales.

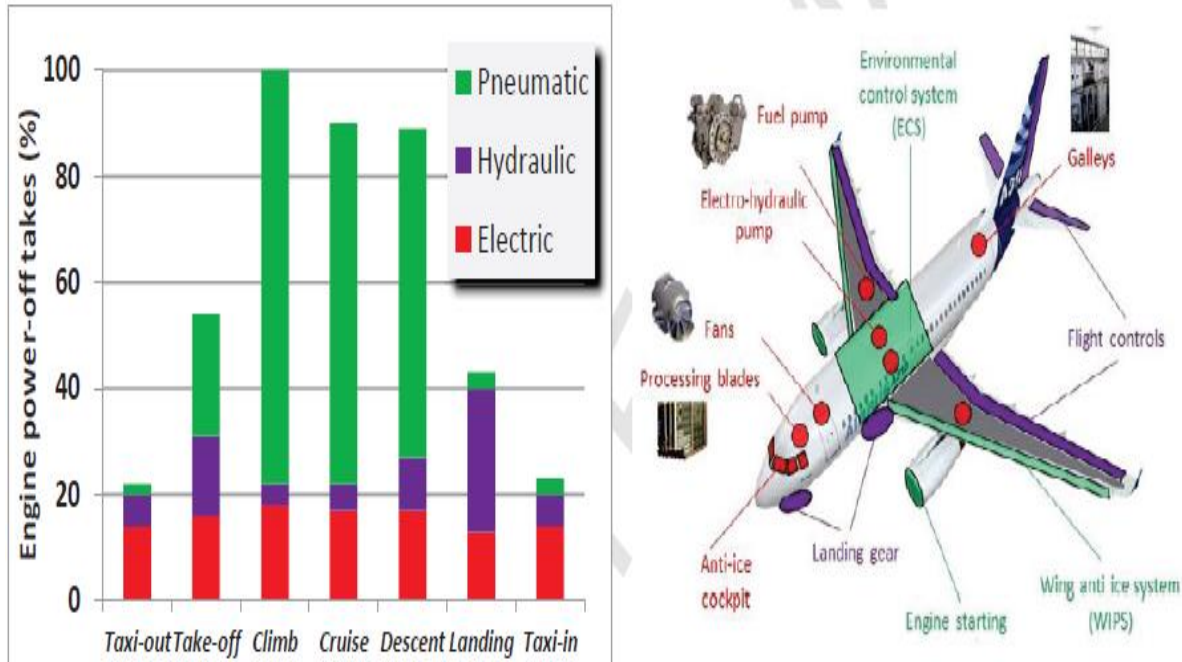


Figura 3 Requerimientos de energía de la aeronave

#### 2.1.4 Áreas de oportunidad

Se puede observar, por las referencias encontradas, que la tendencia es ir reemplazando los sistemas que requieren de fuentes de energía neumática o hidráulica en los aviones comerciales por sistemas eléctricos. La necesidad es tener este tipo de redes eléctricas “inteligentes” capaces de suministrar potencia eléctrica a cargas de manera confiable y con la disponibilidad requerida.

#### 2.2 Requerimientos de diseño en la aviónica.

Todas las funciones descritas anteriormente son implementadas en los sistemas de la aeronave bajo determinadas especificaciones, lo que vuelve un reto importante el diseño de los distintos componentes, las innovaciones en la aviónica se llevan a cabo buscando teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

Reducir peso

Paquetes SMD, Circuitos electrónicos altamente integrados, FPGA, Posicionamiento de componentes

optimizado, cables delgados para arneses, conectores miniaturizados

Bajo consumo de potencia, para que los paquetes de pilas sean más ligeros

Emplear tecnología CMOS, Chipsets de bajo voltaje, clock rate reducido, Sleep modes y enable inputs, optimizar ejecución de programas. Ejemplo: Uso de tablas en vez de procesar datos.

Reconfiguración de los dispositivos durante el vuelo

Actualizaciones de software, uso de múltiples EEPROM y memorias flash, protocolos de programación utilizando telemetría.

Resiliencia mecánica

Protección robusta pero no muy pesada. Encapsular los circuitos impresos en resina y amortiguarlos para soportar mayores vibraciones, utilizar foam para absorber impactos, conectores sellados y hacer pruebas de impacto.

Redundancia funcional

Tener subsistemas idénticos, primario y alterno. Redundancia modular triple, los tres sistemas corren simultáneamente y hay una votación para decidir la lógica, si uno de los tres sistemas falla, se evita el daño de una mala decisión.

Auto prueba

Verificar corrientes, voltajes y temperaturas. Watchdog timers, monitorear radiación, por ejemplo con el uso de fotodiodos para detectar rayos gama.

Operación al vacío. Existen algunos metales que se evaporan al trabajar al vacío, por ejemplo el cadmio. Evitar polímeros que utilizan plastificadores. Evitar flúor polímeros. Utilizar adhesivos reactivos, por ejemplo los epóxicos.

En los últimos diez años, la utilización de la electricidad ha ido en incremento en las aeronaves comerciales. Este nuevo paradigma, conocido como Mas Aeronaves Eléctricas (MEA, por sus siglas en inglés), consiste en reemplazar sistemas energizados de forma neumática o hidráulica por sistemas eléctricos [11]. Considerando el reemplazo de los sistemas de energía neumática e hidráulica, el que presenta retos mayores es el de los sistemas neumáticos. Como se menciona en [11] la sustitución de la energía neumática aumenta en un factor de 4 el requerimiento de energía eléctrica. En la figura 4 se puede ver la tendencia en esta área:

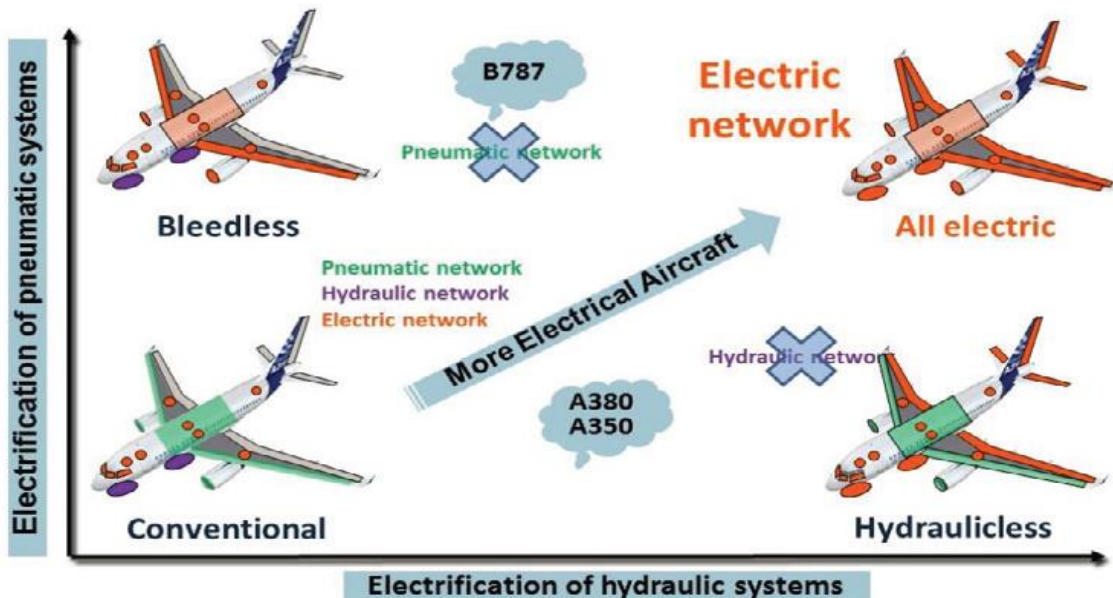


Figura 4 Aeronaves más eléctricas

## Sistemas de la aeronave basados en la aviónica

### 3.1 Introducción

Este capítulo describe algunos de los sistemas más importantes de la aeronave, con los que guarda una estrecha relación la aviónica, se trata del sistema de energía de la aeronave y la aplicación de una metodología para realizar un diseño óptimo de este sistema, esta técnica se llama IMPEC (Integrated Modular Electronics, por sus siglas en inglés). También se detalla el sistema de prevención de impactos en el espacio aéreo. Este sistema se conoce como

ACAS (Airborne Collision Avoidance System, por sus siglas en inglés).

### 3.2 Sistema IMPEC

El sistema IMPEC utiliza los métodos de entrega de potencia eléctrica mencionados en la sección anterior y tiene 2 componentes principales, un set de PEM s modulares idénticos, este set provee HVDC a través de un bus y una matriz de contactores que es utilizada para asegurar la conexión entre los PEM y las cargas, un esquema se muestra en la figura 5:



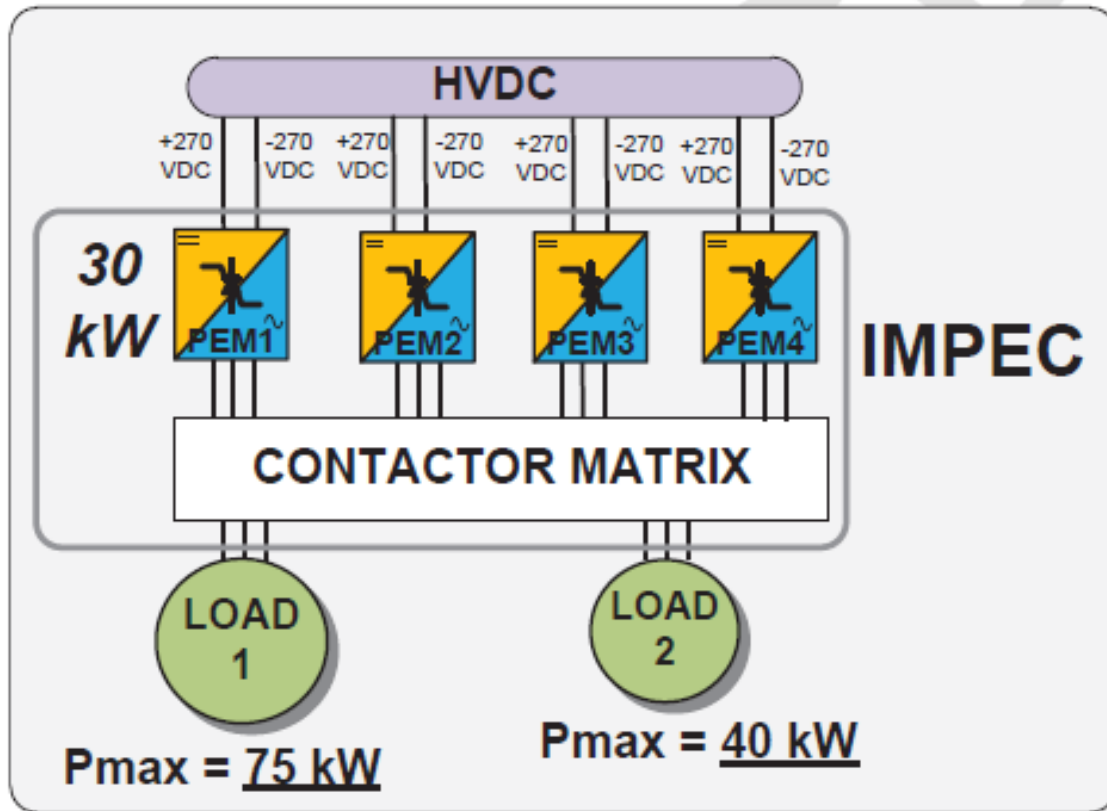


Figura 5 Estructura del sistema IMPEC

En comparación con el sistema integrado de aviónica modular, IMA (Integrated Modular Avionics) por sus siglas en inglés, el procesamiento lo efectúan los respectivos PEM, y la matriz de contactores sirven como red de comunicación con las cargas. Las condiciones de operación del sistema IMPEC pueden ser las siguientes:

Un módulo PEM puede alimentar una carga en determinado instante de tiempo

Un módulo PEM puede alimentar diferentes cargas durante el vuelo.

Una carga puede ser alimentada por uno o varios módulos PEM al mismo tiempo (paralelismo).

Para entender de manera precisa la estructura del sistema, se puede analizar la construcción física (conexiones eléctricas) y por otro lado el desempeño funcional de cada uno de los componentes que lo conforman. La figura 6 ejemplifica un sistema IMPEC con dos módulos PEM:

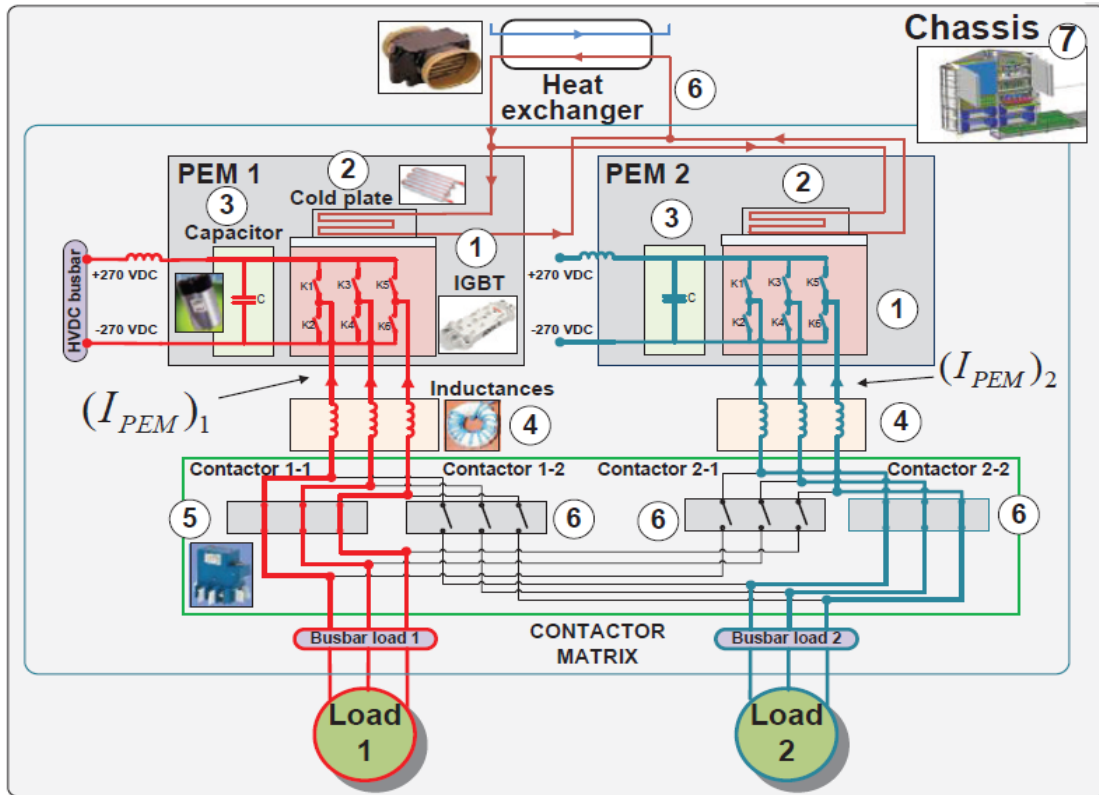


Figura 6 Conexiones eléctricas de un IMPEC de dos módulos PEM

A continuación se explica la lista de componentes y su función:

Dos PEM con tres elementos:

Inversores basados en módulos IGBT

Platos fríos

Capacitores de enlace a DC

Inductancias de una sola fase en las conexiones de salida de cada módulo PEM. Estas inductancias no son obligatorias en los módulos, sin embargo en el ejemplo son agregadas para permitir que los PEM puedan ser intercambiados entre las cargas según se requiera.

La matriz de contactores que permiten las conexiones entre los módulos y las cargas a ser alimentadas.

Un chasis o carcasa que es el soporte mecánico de todos los componentes.

Un intercambiador de calor, que permite evacuar el calor extraído por los platos fríos de los PEM.

### 3.2.1 El diseño del sistema

Es necesario optimizar este proceso de síntesis del sistema, dados los requisitos de diseño en aviación descritos en el capítulo anterior. Esto se puede resumir mediante dos variables, que son:

Número de módulos PEM ( $n_{PEM}Z$ )

Configuración: se refiere a las conexiones carga – módulo para todos los escenarios operacionales, es decir, se necesita contemplar los escenarios posibles de demanda por parte de las cargas y falla por parte de los módulos PEM. Esto se analiza por medio de una matriz tridimensional  $Z$ , que almacena las variables binarias descritas a continuación:

$$\forall m \in \{1, \dots, n_{PEM}\}$$

$$\forall l \in \{1, \dots, L\}$$

$$\forall c \in \{1, \dots, C\}$$

$$Z_{l,m}^c = \begin{cases} 1, & \text{carga } m \text{ conectada al módulo } m \text{ para el caso } c \\ 0, & \text{para cualquier otro caso} \end{cases}$$

En donde  $L$  es el número de cargas y  $C$  es el número de casos de conexiones carga módulo. El proceso de síntesis es de naturaleza iterativa, y depende en gran medida del presupuesto y de las limitantes de peso y tamaño. Un ejemplo de requerimiento de carga puede ser definido por una matriz de cuatro dimensiones:

Etapa de vuelo

falla en dos de los módulos PEM

Falla en distintas cargas

Condición climática adversa

Por ejemplo, en el caso en que se dispone de cinco módulos PEM, la matriz  $Z$  se muestra en la figura 7:

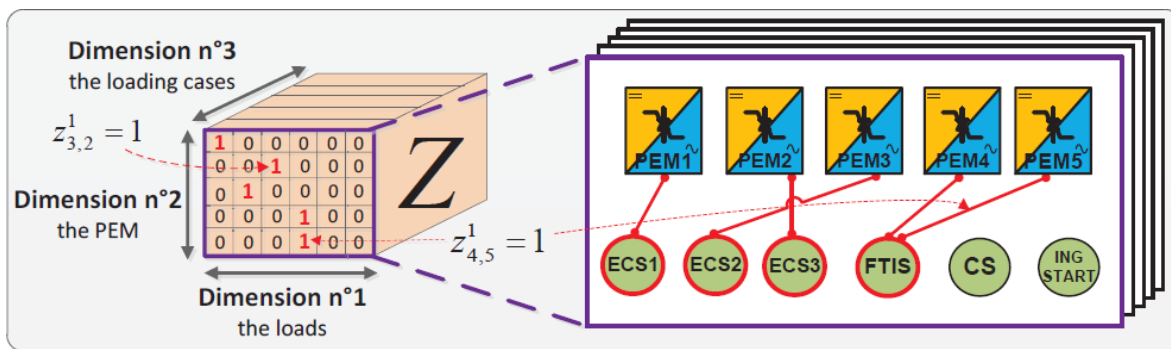


Figura 7 matriz  $Z$ , conexiones carga - módulo requeridas

Uno de los objetivos de diseño más importantes, como se mencionó anteriormente, es minimizar el peso del sistema, esto se puede modelar por la siguiente ecuación:

$$F = (W_s) = \min(n_{PEM} * W_{PEM} + n_L * W_L + n_{ct} * W_{ct} + W_{cha} + W_{hx})$$

En donde  $W_s$  es el peso total del sistema IMPEC, los subíndices PEM se refieren respectivamente al peso y a la cantidad de módulos PEM, los subíndices L se

refieren al peso y cantidad de inductancias,  $W_{cha}$  y  $W_{hx}$  representan los

pesos del chasis y del intercambiador de calor respectivamente

## Conclusiones

La aviónica es un área con la necesidad de mejoras continuas en todos los sistemas que la utilizan para ser diseñados. Esto se debe a que las necesidades de las aeronaves comerciales han ido evolucionando con el paso de los años, siendo cada vez más exigentes debido a cuestiones de seguridad,

economía, reducción de daño ambiental, entre otras. Es por esto que uno de los sistemas que requiere ser rediseñado es el sistema de alimentación eléctrica de los actuadores, para ir reemplazando gradualmente sistemas que requieren energía neumática o hidráulica.

## Referencias

[1] McCormick, B. W. (1995). *Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics* (Vol. 2). New York: Wiley.

[2] [www.easn.net](http://www.easn.net)

[3] [www.femia.com.mx](http://www.femia.com.mx)

[4] Shaji, N. S., Subbulakshmi, T. C., & Resington, M. R. (2013, December). Black box on earth-flight data recording at ground server stations. In *Advanced Computing (ICoAC), 2013 Fifth International Conference on* (pp. 400-404). IEEE.

[5] Liu, L., Wang, S., Liu, D., Zhang, Y., & Peng, Y. (2015). Entropy-based sensor selection for condition monitoring and prognostics of aircraft engine. *Microelectronics Reliability*.

[6] Olguin-Diaz, E., & Garcia-Teran, M. (2014, May). Aerodynamic sectional modeling with the use of extended vectors. In *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014* (pp. 459-469).

[7] Cao, Y., Wu, Z., Su, Y., & Xu, Z. (2015). Aircraft flight characteristics in icing conditions. *Progress in Aerospace Sciences, 74*, 62-80.

[8] Cao, Y., Wu, Z., & Xu, Z. (2014). Effects of rainfall on aircraft aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences, 71*, 85-127.

[9] Van Eykeren, L., & Chu, Q. P. (2014). Sensor fault detection and isolation for aircraft control systems by kinematic relations. *Control Engineering Practice, 31*, 200-210.

[10] Giraud, X., Budinger, M., Roboam, X., Piquet, H., Sartor, M., & Faucher, J. (2015). Optimal design of the Integrated Modular Power Electronics Cabinet. *Aerospace Science and Technology*.

[11] X. Roboam, *New trends and challenges of electrical networks embedded in "more electrical aircraft"*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp 26-31, 27-30, June 2011.

[12] Kochenderfer, M. J., Holland, J. E., & Chryssanthacopoulos, J. P. (2012). Next generation airborne collision avoidance system. *Lincoln Laboratory Journal*, 19(1), 17-33.