

PRINCIPIOS GENERALES DE DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL TÉRMICO DE UN SATÉLITE

Jorge Mora

Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE)

Borburata, Venezuela

jmorab@abae.gob.ve

Abstract--- El subsistema de control térmico de un satélite es el encargado de mantener la temperatura del mismo dentro de los rangos de temperatura apropiados para operar correctamente en el duro ambiente espacial y de esta manera llevar a cabo la misión que motivó su puesta en órbita. Con este objeto, dicho subsistema hace uso de métodos de control térmicos pasivos y activos, siendo la diferencia entre ambos que los últimos requieren el suministro de energía eléctrica, recurso muy preciado y escaso dentro del satélite, por lo cual se evita su uso a menos que sea estrictamente necesario. Una vez escogidos los métodos de control térmico a emplear en el satélite, se requiere modelar matemáticamente la red térmica que representa todos los equipos del satélite, ello como la energía que se encuentra en el interior del satélite y debe ser irradiada al espacio exterior, mediante el uso de radiadores y de esta manera lograr el balance térmico del satélite. Seguidamente, dicho modelo es validado con la prueba de balance térmico para, en función de los resultados obtenidos, corregir el modelo matemático inicial. Finalmente, se construye el modelo de vuelo del satélite que será sometido a la prueba de vacío térmico.

I. INTRODUCCIÓN

El subsistema de control térmico de un satélite se diseña siguiendo principios y lineamientos que permiten el máximo aprovechamiento de los presupuestos de masa, potencia y canales de telemetría-telecomando.

Dicho subsistema tiene como misión mantener la temperatura de todos los equipos del satélite dentro de márgenes preestablecidos que permiten una operación correcta de los mismos. Para lograr tal propósito, se usan distintos dispositivos que, cambiando las características termo-físicas y termo-ópticas de los equipos, permiten ordenar y dosificar tanto los flujos de calor que entran al satélite como aquellos que salen del mismo.

A continuación se brindan los principios generales que permiten llevar a cabo el diseño del subsistema de control térmico de un satélite.

II. PRINCIPIO GENERAL DEL DISEÑO TÉRMICO

Los siguientes puntos serán tomados en consideración durante el diseño térmico de un satélite:

- Como uno de los elementos de diseño de un satélite, el diseño térmico proporciona un ambiente térmico apropiado para los equipos en el satélite.

- El desempeño mecánico, eléctrico y óptico de los equipos o estructuras están correlacionados con la temperatura. Iteraciones

innecesarias para el diseño de satélites pueden evitarse al considerar exhaustivamente la interacción entre los factores mecánicos, eléctricos, ópticos y térmicos desde el comienzo de la fase de factibilidad.

- La energía eléctrica consumida por el satélite puede convertirse en energía mecánica, energía de radiación electromagnética, energía luminosa y energía térmica. Hay un equilibrio en el satélite entre la energía térmica producida por la energía eléctrica y otras clases de energía, y la energía térmica absorbida desde el espacio y la irradiada al mismo. La recolección, transferencia, almacenaje, utilización y disipación de la energía térmica se administrará exhaustivamente para promover la efectividad.

- Las especificaciones técnicas y las restricciones son la base del diseño térmico, las mismas pueden ser modificadas hasta cierto grado mediante negociación cuando sea necesario.

III. MISIÓN DEL DISEÑO TÉRMICO

La misión del diseño térmico es hacer que los parámetros térmicos del satélite, como la temperatura (incluyendo el rango de temperatura, gradiente de temperatura, diferencia de temperatura, uniformidad de temperatura, y estabilidad de temperatura) y otros requerimientos técnicos relacionados, se encuentren dentro de los requerimientos de la misión bajo todas las condiciones esperadas controlando el intercambio térmico dentro y fuera del satélite[1].

IV. COMPOSICIÓN DEL SUBSISTEMA DE CONTROL TÉRMICO

El subsistema de control térmico se compone generalmente de productos térmicos que incluyen equipos y programas térmicos. Los equipos de control térmico incluyen los recubrimientos de control térmico, mantas de aislamiento, rellenos térmicos, aislantes térmicos, expansores térmicos, trenzas térmicas, sensores de temperatura, tubos de calor, calentadores eléctricos, dispositivos de materiales de cambio de fase, las persianas, los radiadores térmicos y las unidades de control térmico.

V. CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL DISEÑO TÉRMICO

Un subsistema de control térmico tendrá las siguientes características:

- Controlar la cantidad de energía térmica absorbida del ambiente exterior y disipada en el espacio profundo por el satélite.

- Llevar a cabo la recolección del calor, la difusión del calor y la transferencia de calor del satélite y de los productos instalados en éste; y controlar la trayectoria y dirección del flujo del calor.

- Almacenar la energía térmica producida por el satélite y los productos instalados en el mismo, y liberarla cuando sea necesario.
- Controlar los rangos de temperatura, diferencias de temperatura, gradientes de temperatura, estabilidades de temperatura y uniformidades de temperatura de los productos del satélite.

VI. MODOS DE CONTROL DEL DISEÑO TÉRMICO

Generalmente, se usan tres modos de control para controlar los parámetros térmicos y de esta manera garantizar las características funcionales del satélite[2]:

- Control térmico pasivo, es decir, controlar la salida o entrada de energía térmica del satélite y asegurar que la temperatura del mismo sea controlada dentro del diseño de cierto rango sólo mediante el uso de las características propias de los dispositivos y de los materiales, tales como la característica de radiación térmica, la conductividad térmica y así sucesivamente. No tiene partes móviles y no consume energía eléctrica o consume muy poca, lo cual le confiere una capacidad altamente confiable. Sin embargo, la precisión de este modo de control térmico no es muy alta. Los métodos de control térmico pasivos usualmente usan los siguientes materiales y dispositivos: recubrimientos de control térmico, láminas de aislamiento multicapas, tuberías de calor, relleno térmico, etc.
- Control térmico activo, es decir, ajustar la temperatura de un objeto como se requiera de acuerdo a su cambio de temperatura. Generalmente el método de control térmico activo tiene la característica de alta precisión de control, alta agilidad y capacidad de control, pero también tiene partes móviles o disipa energía eléctrica en forma de calor[3].
- Combinación de control térmico pasivo con control térmico activo.

VII. ENTRADAS DEL DISEÑO TÉRMICO

A. Requerimientos Técnicos del Diseño

Los requerimientos técnicos generales para el diseño térmico de satélites son los siguientes[1]:

1) *General*: El diseño del subsistema de control térmico debe cumplir con los requerimientos térmicos de la misión, los requerimientos de desempeño térmico, los requerimientos de interfaz con otros subsistemas.

El diseño del subsistema de control térmico debe hacer uso de materiales y características de diseño compatibles con los factores ambientales esperados durante todas las fases de la misión incluyendo posibles efectos y degradaciones.

La degradación puede ser causada por desgaste, cargas mecánicas, ambiente de prueba, y ambiente en órbita (por ejemplo: oxígeno atómico, rayos ultravioleta, radiación).

El diseño del subsistema de control térmico debe ser documentado en el documento de diseño de detalle del subsistema de control térmico.

Propiedades confiables de los materiales y sus valores degradados bajo el ambiente especificado deben ser usados en el diseño.

Si no hay disponibles datos apropiados, entonces debe implementarse un programa de prueba del material.

2) *Asignación del Presupuesto*: El subsistema de control térmico debe definir para la aprobación de sistemas presupuestos para masa, tamaño, potencia, energía, canales de telemetría y telecomando y aspectos operacionales a lo largo del ciclo de vida del subsistema de control térmico.

3) *Partes, Materiales y Procesos (PMP)*: El diseño del subsistema de control térmico debe usar partes, materiales y procesos con calificación espacial. Por ejemplo: lista de partes, materiales y procesos (PMP) preferidos.

Un programa de aceptación o calificación debe ser llevado a cabo bajo acuerdo con la autoridad del sistema para partes, materiales o procesos, que no hayan alcanzado aún un estado de calificación espacial.

Deben producirse listas de materiales declarados, partes mecánicas y procesos de acuerdo al documento de definición de requerimientos (DRD) especificado en ECSS-Q-ST-70 de la lista de material declarado (DML).

4) *Componentes Electrónicos, Eléctricos y Electromecánicos (EEE)*: El diseño del subsistema de control térmico debe usar componentes electrónicos, eléctricos y electromecánicos (EEE).

Un programa de aceptación o calificación debe ser llevado a cabo bajo acuerdo con la autoridad del sistema para componentes electrónicos, eléctricos y electromecánicos (EEE), que no hayan alcanzado aún un estado de calificación espacial.

5) *Tiempo de Vida*: El diseño del subsistema de control térmico debe ajustarse al tiempo de vida total cubriendo combinaciones esperadas de las fases de la misión.

6) *Previsibilidad y Capacidad de Prueba*: El subsistema de control térmico debe ser diseñado de manera tal que el cumplimiento de los requerimientos de desempeño pueda ser demostrado mediante análisis térmico y prueba térmica.

La modularidad del diseño del subsistema de control térmico puede facilitar su previsibilidad y capacidad de prueba.

7) *Flexibilidad*: El diseño del subsistema de control térmico debe incorporar flexibilidad para satisfacer modificaciones de requerimientos impuestas al subsistema de control térmico durante la fase de desarrollo del proyecto y ofrecer capacidades de recorte para ajustarse a actualizaciones tardías de requerimientos.

8) *Integración y Accesibilidad*: La localización y el diseño de los equipos del subsistema de control térmico debe proveer accesibilidad sin disminución del desempeño para permitir la integración, montaje/desmontaje, inspección y mantenimiento de artículos durante el ensamblaje, integración y prueba (AIT) y durante el vuelo.

9) *Confiabilidad*: La figura de confiabilidad asignada para el subsistema de control térmico debe ser especificada a nivel de sistema.

El subsistema de control térmico debe demostrar mediante análisis y pruebas que la figura de confiabilidad asignada se cumple.

Los requerimientos de confiabilidad para el diseño de artículos individuales del subsistema de control térmico deben ser especificados y verificados.

Estos requerimientos de confiabilidad pueden ser cumplidos incorporando características adecuadas de redundancia;

El subsistema de control térmico debe cumplir los requerimientos del sistema con respecto a los puntos únicos de falla.

10) *Intercambiabilidad*: Los requerimientos de intercambiabilidad a ser cumplidos por el subsistema de control térmico deben ser especificados a nivel de sistema.

11) *Mantenimiento*: El subsistema de control térmico debe especificar procedimientos de mantenimiento.

Debe evitarse el mantenimiento operacional durante las fases en órbita[4].

B. Condiciones de Restricción del Diseño

Las condiciones de restricción del diseño térmico de satélites incluyen:

- Requerimientos de la misión;
- Condiciones del ambiente espacial del satélite;
- Definición de órbitas del satélite;
- Configuración del satélite;
- Disposición de equipos del satélite;
- Modos de operación del satélite;
- Programa de vuelo;
- Orientación del satélite;
- Propiedades de los materiales;
- Datos de la interfaz de los equipos del satélite (es decir tamaño, peso, capacidad calorífica, disipación de calor);
- Ubicación de los sensores de temperatura y otras condiciones relevantes;
- Especificaciones técnicas relevantes.

VIII. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL DISEÑO TÉRMICO

Los principios básicos del diseño térmico son los siguientes:

A. Conformidad

Las funciones y desempeño del subsistema de control térmico estarán en conformidad con los requerimientos.

B. Economía

El subsistema de control térmico será optimizado para hacer que la masa, energía y costo de desarrollo sean lo mínimo posible bajo la premisa de cumplir con los requerimientos de función y desempeño.

C. Sucesión

Los componentes de control térmico probados en vuelo serán utilizados para reducir tiempo y costos de desarrollo, y para incrementar la confiabilidad.

D. Adelanto

La tecnología o productos nuevos calificados así como los probados en vuelo serán usados para incrementar el desempeño y confiabilidad del subsistema de control térmico.

E. Capacidad de verificación

Se usará un diseño térmico que pueda ser verificado mediante prueba o análisis térmico y se evitará un diseño térmico que sea difícil de probar o no pueda probarse.

F. Proceso

Usar el diseño térmico con buenas técnicas de fabricación, ensamblaje y prueba para evitar los riesgos derivados de técnicas pobres.

IX. EL AMBIENTE ESPACIAL, EL AMBIENTE INDUCIDO Y SUS EFECTOS

A. Radiación solar

Para el diseño térmico de un satélite, es comúnmente aceptado que:

- La radiación integrada de luz solar sobre una superficie perpendicular a la luz solar situada a la distancia media entre la tierra y el Sol (1 AU) fuera de la atmósfera es conocida como la constante solar. El valor promedio de la constante solar es igual a 1367 W/m^2 . la radiación integrada de luz solar que alcanza la tierra varía con la distancia a la tierra desde el sol, cerca del 4 de Julio, la radiación integrada de luz solar tiene un valor mínimo de 1322 W/m^2 , y cerca del 3 de Enero la radiación integrada de luz solar tiene un valor máximo de 1414 W/m^2 . La desviación de estos datos es $\pm 5 \text{ W/m}^2$.

- El espectro solar está cerca de la radiación de un cuerpo negro a una temperatura característica de 5777 K . la radiación integral de ultravioleta es de aproximadamente 7% de la radiación total, la de la banda de onda visible es 46%, la de IR es de aproximadamente 47%. El valor máximo de radiación en el espectro aparece a una longitud de onda de $0,5 \text{ m}$ aproximadamente.

- La radiación solar ultravioleta a largo plazo generalmente produce un incremento en la absorción de la luz solar de los recubrimientos de control térmico que se encuentran en la superficie del satélite, y entonces hace que la temperatura del satélite y de sus equipos aumento gradualmente.

B. Radiación del Albedo de la Tierra

Para el diseño térmico de un satélite, es comúnmente aceptado que:

- El espectro de la radiación del albedo de la tierra es similar a el de la radiación solar;

- La radiación del albedo de la tierra es reflexión difusa;

- El rango del albedo de la tierra es cerca de $0,05 \sim 0,6$, y el valor medio anual está sobre $0,30 \pm 0,05$;

C. Radiación Infrarroja de la Tierra

Para el diseño térmico de un satélite, es comúnmente aceptado que:

- El valor medio de la emisividad radiante de la tierra varía desde 150 W/m^2 hasta 350 W/m^2 y el valor medio anual es de aproximadamente 239 W/m^2 ;

- La distribución del espectro de la radiación infrarroja de la tierra es complejo, cercano a la distribución del espectro de la radiación térmica del satélite;

- La tierra es un cuerpo de reflexión difusa;

D. Contaminación

Las macropartículas procedentes de los motores espaciales, de los propulsores del satélite durante su funcionamiento y de los materiales volátiles pueden ser depositadas en la superficie del satélite y contaminar la superficie de control térmico, y producir entonces una degradación de la propiedad de radiación térmica.

E. Efecto de la pluma de los propulsores

El impacto de la recirculación de la llama y de la radiación del gas producido por los motores del cohete y los propulsores del satélite sobre el satélite depende de la distancia, orientación y propiedades de los materiales. Será llevado a cabo un análisis específico de la pluma para determinar el grado del impacto.

X. CONFIGURACIÓN DEL SUBSISTEMA DE CONTROL TÉRMICO

Determinar la configuración del subsistema de control térmico negociando suficientemente con los diseñadores del sistema u otros subsistemas. Durante este tiempo, el trabajo es como sigue:

- Determinar los métodos para controlar la absorción del flujo de calor del ambiente.

- Determinar los métodos y las trayectorias para transferir calor desde la fuente de calor hacia el espacio.
- Determinar los métodos para controlar la temperatura del equipo o de la posición que tiene requerimientos especiales de temperatura.
- Determinar la composición básica del subsistema de control térmico.

XI. OBJETIVO DEL DISEÑO TÉRMICO

De acuerdo a los requerimientos establecidos para el diseño térmico, el mismo se completará para que el desempeño y la función del subsistema de control térmico cumpla los requerimientos considerando los márgenes de diseño, analizando el ambiente de operación del satélite y seleccionando un método de control razonable.

XII. DISCIPLINA DEL DISEÑO TÉRMICO

La disciplina del diseño en cuanto a su función y desempeño es como sigue:

- Considerar simultáneamente los requerimientos de temperatura, masa, energía, y así sucesivamente, y la influencia mutua entre estos requerimientos.
- Asegurar que la temperatura prevista del equipo no sea mayor que el límite superior del rango de temperatura de operación durante el peor caso caliente, y que la temperatura prevista del equipo no sea menor que el límite inferior del rango de temperatura de operación o el rango de temperatura de inoperación durante el peor caso frío.
- Determinar el consumo de energía de los calentadores según los requerimientos durante el peor caso frío.
- Seleccionar en primer lugar métodos de control térmico y componentes simples y altamente confiables.

XIII. ANÁLISIS DEL CASO TÉRMICO DEL DISEÑO

El diseño térmico del satélite se enfoca en el peor caso caliente y el peor caso frío. Para determinar el peor caso, serán considerados los siguientes factores:

A. Condiciones Ambientales del Satélite

- El satélite se encuentra en condiciones ambientales diferentes durante las fases de prelanzamiento, lanzamiento y ascenso, y la fase orbital.
- El flujo de calor de la radiación solar y de la tierra que alcanza la superficie del radiador de calor del satélite es influenciado por la altura de la órbita, el ángulo entre la luz del sol y la superficie del radiador del satélite, eclipses, tiempo de iluminación, etc, para satélites que operen en órbitas terrestres.

B. Modos de Operación del Satélite

- La influencia de la orientación del satélite sobre el flujo de calor ambiental absorbido durante cada fase operativa;
- La influencia del cambio de configuración del satélite, tales como los paneles solares, las antenas, el desplegado y plegado de los radiadores desplegables, y así sucesivamente, durante cada fase operativa.
- Durante cada fase del funcionamiento, los modos de operación de equipo con máximo y mínimo la disipación de calor será considerada, incluyendo la influencia del cambio del voltaje del autobús en la disipación de calor.

XIV. MÉTODOS DE DISEÑO TÉRMICO

A. Absorción y Expulsión de Calor

Los principios de selección de los métodos de absorción y expulsión de calor son:

1) *Radiador de Calor*: El intercambio de calor del satélite con el espacio es llevado a cabo principalmente por el radiador de calor. Los métodos de diseño del radiador de calor son:

- Determinar el tipo, cantidad, posición de instalación, dirección, recubrimiento de control térmico, área y temperatura del radiador de calor según los resultados del análisis del caso de diseño térmico, rango de temperatura de operación y rango de temperatura de no operación de los equipos.

- Los tipos opcionales de radiador de calor incluyen generalmente el radiador de calor de panel estructural que fija el panel estructural como placa base, los radiadores de calor colocados sobre el cuerpo los cuales son instalados en la superficie externa del satélite como partes estructurales, el radiador de calor desplegable y otros tipos de radiadores.

- Los radiadores de calor serán diseñados para que sean mutuamente independientes de acuerdo a los requerimientos de los equipos del satélite en el rango de temperatura de operación y el rango de temperatura de no operación. Los equipos que tengan una alta disipación de calor o un alto flujo de calor serán montados directamente en la placa base de los radiadores de calor de panel estructural que tengan un flujo de calor bajo. Los equipos que tengan requerimientos altos de estabilidad de temperatura serán montados de manera independiente en la placa base de los radiadores que tengan el menor cambio periódico de flujo de calor.

- El flujo de calor absorbido por la superficie del radiador de calor será bajo y estable, y el campo de vista que señala al espacio criogénico no será bloqueado.

- Es un método importante usar recubrimientos de control térmico para ajustar el flujo de calor que viene del ambiente espacial y el flujo de calor expulsado al espacio. Para un satélite de órbita terrestre, el flujo de calor absorbido de la radiación solar será tan bajo como sea posible, y el flujo de calor transferido al espacio será lo más alto posible, durante este tiempo, los recubrimientos de control térmico con baja absorptividad solar y alta emisividad en la superficie del radiador de calor será seleccionada.

- El área y temperatura del radiador de calor serán determinadas por el flujo de calor ambiental absorbido por el radiador de calor, la disipación de calor de los equipos del satélite, y los requerimientos del rango de temperatura de operación y del rango de temperatura de no operación.

- Para incrementar la eficiencia de disipación de calor del radiador de calor de panel estructural, los tubos de calor pueden montarse sobre o dentro del panel estructural.

2) Aislamiento de Capas Múltiples (MLI) y Barreras de Radiación

El flujo de calor que se absorbe desde o se expulsa hacia el espacio puede ser controlado usando MLI sobre la superficie del satélite que se encuentra bajo un ambiente no atmosférico exceptuando el radiador y métodos de aislamiento con espuma, fibra de vidrio y aerogel bajo el ambiente atmosférico. Para la cámara de combustión del propulsor o motor, pueden usarse MLI o barreras de radiación para disminuir el flujo de calor hacia los equipo desde partes de alta temperatura o la pluma.

3) *Combinación de Varios Métodos*: Es un método de diseño térmico común controlar la absorción y expulsión de calor usando un radiador, MLI y barreras de radiación.

B. Recolección y Transferencia de Calor

Los principios de selección de los métodos de recolección y transferencia de calor son los siguientes:

1) *Tubos de Calor de Conductancia Constante:* Pueden usarse tubos de calor de conductancia constante para recolectar y transferir calor entre partes de un equipo o entre un equipo y el radiador de calor, y la capacidad de recolección y transferencia de calor depende del desempeño del tubo de calor, y la resistencia térmica depende principalmente de la resistencia de contacto térmico entre el tubo de calor y el equipo o entre el tubo de calor y el radiador de calor.

2) *Conducción Térmica:* La disipación del equipo será transferida directamente al radiador de calor a través de la conductancia térmica de contacto, o mediante partes de alta conductividad térmica hacia el radiador. Puede colocarse relleno térmico en el área de contacto para aumentar la transferencia de calor por contacto.

3) *Radiación Térmica:* Hay un recubrimiento de alta emisividad sobre el equipo dentro del satélite, y el calor puede ser transferido directa o indirectamente al radiador de calor mediante radiación térmica.

C. Compensación Térmica

La compensación térmica eléctrica es un método común para compensar térmicamente al satélite, la misma es lograda usualmente mediante un controlador y calentadores. Dicho método puede ser controlado mediante calentamiento ininterrumpido con corriente constante, y también se puede controlar por telecomando, comandos de control programados, modo de control automático, etc.

D. Aislamiento Térmico

Los principios de selección de los métodos de aislamiento térmico son los siguientes:

1) *Aislamiento de Conducción de Calor:* Usar aislantes térmicos hechos de materiales con baja conductividad térmica, o reducir el área de contacto térmico, aumentar la resistencia de conducción térmica, disminuir el flujo de calor por conducción.

Este método de aislamiento térmico es usado normalmente para reducir el acoplamiento térmico entre módulos o entre un equipo y el satélite.

2) *Aislamiento de Radiación Térmica:* Usar MLI o barreras de aislamiento con baja emisividad para reducir el flujo de calor por radiación bajo una condición de vacío. De acuerdo a los distintos requerimientos de rangos de temperatura de operación, pueden seleccionarse MLI o barreras de aislamiento para temperatura criogénica, para temperatura convencional o para alta temperatura.

Este método de aislamiento térmico se usa normalmente para reducir el acoplamiento térmico entre los módulos o entre los equipos y el satélite.

Los métodos de aislamiento de conducción de calor y radiación térmica no requieren suministro de energía eléctrica y no poseen partes móviles, son fáciles de construir y tienen una alta confiabilidad. Los métodos y productos de aislamiento térmico serán seleccionados según el mecanismo de aislamiento térmico y el rango de temperatura de operación.

E. Almacenaje y Uso del Calor

Los principios de selección de los métodos de almacenaje y uso del calor son los siguientes:

- Usar la capacidad calorífica de los materiales para almacenar y liberar energía térmica.

- Usar el calor latente de los materiales para almacenar y liberar energía térmica.

Para los siguientes casos, serán considerados el almacenaje y uso del calor:

- Debido a la variación periódica de la fuente de calor externa, o al modo de operación intermitente de los equipos, el rango de temperatura de operación y la estabilidad de la temperatura de los equipos no pueden ser satisfechas.

- Es difícil expulsar el calor que proviene de los equipos que pueden expandirse, usarse solamente a corto plazo y tienen alta potencia, debido a limitaciones tales como posición de montaje, y así sucesivamente.

F. Control Termostático

El control termostático es un método común para controlar el rango de temperatura de operación, gradiente de temperatura, diferencia de temperatura, uniformidad de temperatura y estabilidad de temperatura. Los métodos de control termostático y sus principios de selección son los siguientes:

- Calentador Eléctrico para el Control Termostático. El calentador eléctrico es un método común para el control termostático. El controlador, el calentador, y otras partes se usan normalmente para cumplir la función de control termostático. El calentador eléctrico puede ser controlado por telecomando, comandos de control programados, modo de control automático, etc.

- Los equipos que necesitan generalmente control termostático incluyen: cargas útiles, baterías, tanques de propelente, tuberías, válvulas, propulsores, cronómetros, sensores fuera del satélite, mecanismos del despliegue fuera del satélite, motores, equipos con requerimientos especiales para el límite inferior de la temperatura de encendido, y así sucesivamente[1].

XV. MÉTODOS PARA MEJORAR EL DISEÑO TÉRMICO

A. Diseño de Mejora de la Conductividad Térmica

Para mejorar la conductividad térmica, los siguientes métodos son usados comúnmente:

- Un método consiste en untar relleno térmico, láminas de indio o algunos otros materiales en la superficie de contacto de instalación. Para los dispositivos con una alta generación de calor, debe haber relleno térmico entre la superficie de instalación y su placa de montaje, para de esta manera mejorar el intercambio de calor por conducción entre el dispositivo y la cabina. El dispositivo y la placa de montaje sobre la que se necesita untar relleno térmico debe tener una planicidad alta mayor que 0,1/100mm.

- Otro método es mejorar el área conductiva de calor con un distribuidor térmico. En este método, una placa metálica con un área mayor que la superficie de instalación del dispositivo es instalada en el equipo como placa de montaje, de manera que el área de contacto entre el dispositivo y la placa de montaje de la cabina se incrementa y la conductividad térmica es mejorada, además el distribuidor térmico tiene una capacidad calorífica relativamente grande y puede absorber calor de los equipos rápidamente, por lo tanto, el distribuidor térmico tiene la función de estabilizar la temperatura de los equipos. Comúnmente el distribuidor térmico está hecho de una aleación de aluminio, su espesor se encuentra en un rango de

2~5mm, como por ejemplo el distribuidor térmico instalado en la parte inferior de la caja de montaje del giroscopio.

- Para los dispositivos con gran generación de calor dentro de la cabina, los cuales no pueden disipar directamente el calor al espacio, o los dispositivos con requerimientos de temperatura estrictos, podemos usar un cable conductor, un tubo de calor irregular y un tubo de calor blando para trasladar el calor generado dentro del dispositivo a la placa de la cabina en el exterior, el calor en la placa de la cabina será disipado por radiación al espacio, como por ejemplo la disipación de calor del dispositivo CCD de la cámara.

B. Diseño de Mejora de la Radiación Térmica

Para mejorar la radiación térmica, los siguientes métodos siempre son usados en el diseño.

- Para mejorar la radiación térmica entre los dispositivos y los paneles de la estructura, las superficies de los paneles de la estructura dentro de la cabina son manejadas comúnmente con una emisividad no menor que 0,85. Usualmente la placa es pintada con pintura blanca SR107, cuya emisividad es $0,87 \pm 0,02$.

- Los dispositivos y componentes siempre son pintados con un recubrimiento térmico de alta emisividad o anodizados en negro con una emisividad no menor que 0,85. La pintura negra E51M, el anodizado en aluminio y algunos otros métodos son comúnmente usados.

- Adherir películas con alta emisividad en los lugares en los que es necesario mejorar la radiación térmica. Usualmente se usa una película de F46 recubierta con aluminio, una película con pintura blanca, una película de poliamida carburada en negro, etc.

- Usar un recubrimiento con baja absorbancia solar y alta emisividad infrarroja en el área del radiador de la placa de la cabina, tales como pintura blanca S781, pintura blanca SR107-ZK, recubrimiento de aluminio o un reflector óptico solar (OSR) de cristal de cuarzo recubierto en plata, etc.

C. Diseño de Aislamiento Térmico

Los siguientes métodos son usualmente usados en el diseño de aislamiento térmico.

- Para reducir la conducción térmica de dos objetos, los aislantes térmicos pueden ser instalados en la superficie de instalación. Usualmente el material de los aislantes térmicos no es metálico, comúnmente se usan plásticos reforzados con fibra de vidrio, poliamidas, aislante multicapa y algunos otros materiales.

- Para reducir el intercambio de calor entre el satélite y el espacio, la superficie exterior del satélite debe cubrirse con láminas de aislante multicapas exceptuando el radiador.

- Para los dispositivos y componentes con requerimientos especiales de temperatura para equipos próximos, tales como el tanque de propelente, tuberías, batería de acumuladores, etc, es mejor pintar un recubrimiento con baja emisividad o cubrir tanto su superficie como los alrededores con láminas de aislante multicapas, de manera que se reduzca el intercambio de calor.

D. Diseño Isotérmico con Tubos de Calor

Debido a que la eficiencia de transferencia de calor del tubo de calor es mucho mayor que la de los materiales en general, el tubo de calor está siempre incrustado y aplicado externamente a la placa estructural para mejorar su capacidad de transferencia de calor en una dirección determinada, para de esta manera lograr que la placa estructural sea isotérmica. Comúnmente el diseño isotérmico es como sigue:

- Para los dispositivos y estructuras con diferentes temperaturas, usar tubos de calor para conectarlos y que su temperatura pueda igualarse. Por ejemplo, el desvío y el mecanismo de descarga tienen un consumo de calor elevado pero un tiempo de generación diferente,

si los dos dispositivos son instalados en una placa de cabina con un tubo de calor incrustado, la temperatura de los dos dispositivos puede ser igualada de manera efectiva, lo cual puede evitar un sobrecalentamiento de ambos dispositivos.

- Para algunos dispositivos que necesitan un método de disipación de calor especial, podemos conectarlos a un extremo de un tubo de calor, mientras el otro extremo del tubo de calor es conectado al radiador, de esta manera el calor del dispositivo puede ser disipado de manera efectiva.

- Para mejorar el área de transferencia de calor del tubo de calor, pueden haber aletas en los tubos, como los tubos de calor con sección transversal en forma de I, T y Ω [3].

XVI. MARGEN DE DISEÑO TÉRMICO

A. Margen de Temperatura

Generalmente, el margen de temperatura es:

- Para equipos con control térmico pasivo cuyo modelo térmico analítico ha sido verificado por la prueba de balance térmico para correlación, el margen de diseño térmico será normalmente 11K; para un satélite geoestacionario de larga vida útil con técnicas maduras, el margen de diseño térmico no es menor de 5K; para un detector del espacio profundo, el margen de diseño térmico será mayor de 11K.

- Generalmente, para equipos con control térmico pasivo, cuyo rango de temperatura calculado no pueda ser verificado por la prueba de balance térmico, el margen de diseño térmico será fijado como 17K.

- Las incertidumbres de las propiedades físicas de los materiales y del coeficiente de contacto térmico, y el error arrojado por la simplificación del modelo también serán considerados para el diseño del gradiente de temperatura, de la diferencia de temperatura, de la uniformidad de temperatura, y de la estabilidad de temperatura.

B. Márgenes de Diseño de Otros Parámetros

Generalmente, los márgenes de diseño de otros parámetros son los siguientes:

- Los márgenes de diseño térmico para componentes sensibles a la temperatura controlados por un circuito de control de temperatura, como baterías, giroscopios, cronómetros, cámaras, etc, son los márgenes de energía de los calentadores del control de temperatura. La energía del calentador tendrá por lo menos un margen de 25% cuando la temperatura del componente esté en el límite inferior. Por ejemplo, la energía de calentamiento media real usada será de menos de 80W para el calentador con control PID cuya energía nominal es de 100W. Si se emplean calentadores controlados por interruptores, la tasa de servicio será menor del 80%.

- Los márgenes de diseño térmico de los tubos de calor de conductancia constante incluirán el margen de la capacidad de transferencia de calor y del flujo de calor cuando se usan los tubos de calor para transferir calor. La capacidad de transferencia de calor máxima y el flujo de calor de los tubos de calor será 25% mayor que la carga de calor verdadera. Por ejemplo, si la capacidad de transferencia de calor máxima del tubo de calor es $100 \text{ W}\cdot\text{m}$, la carga de calor real será menor de $80 \text{ W}\cdot\text{m}$. Si la densidad de flujo de calor máxima de la sección de evaporación del tubo de calor es $1 \text{ W}/\text{cm}^2$, la densidad de flujo de calor real será menor de $0,8 \text{ W}/\text{cm}^2$.

- Para el diseño térmico que controla la temperatura de los equipos a menos de 203K usando un refrigerante o un refrigerador consumible, el margen de diseño térmico es el margen de la capacidad de refrigeración. La capacidad de refrigeración será 35% mayor que la carga de calor real (incluyendo la carga de calor parásito). Por ejemplo, si la capacidad de refrigeración es 100W, la carga de calor verdadera será menor de 74W[1].

C. Temperatura

Los requerimientos detallados del subsistema de control térmico del satélite serán constituidos con base en las condiciones reales del satélite y según los artículos indicados aquí para el satélite. El subsistema de control térmico tiene varios parámetros primarios, tales como rango de temperatura, diferencia de temperatura, gradiente de temperatura, estabilidad de temperatura y uniformidad de temperatura. El satélite y los productos de control térmico deberán cumplir con los siguientes requerimientos de temperatura:

- La temperatura más baja en el peor caso frío y la temperatura más alta en el peor caso caliente del satélite y los productos de control térmico deberán cumplir el requerimiento del rango de la temperatura de diseño.

- Los rangos de temperatura de diseño de los productos del satélite serán validadas y comprobadas por puntos de referencia de temperatura.

- Los siguientes parámetros y sus valores de diseño listados a continuación deben cumplir el requerimiento de documentos técnicos especiales de ser necesario:

- Valor máximo y valor mínimo de la diferencia de temperatura.
- Valor máximo y valor mínimo del gradiente de temperatura.
- Valor máximo y valor mínimo de estabilidad de temperatura.
- Valor máximo y valor mínimo de uniformidad de temperatura.

D. Masa

La masa del subsistema de control térmico debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- Para un satélite cuya masa total no sea mayor de 500kg, la masa del subsistema de control térmico no excederá el 6% de la masa total.

- Para un satélite cuya masa total sea mayor de 500kg, la masa del subsistema de control térmico no excederá el 4% de la masa total.

E. Disipación de Energía

La disipación de energía del subsistema de control térmico cumplirá los siguientes requerimientos:

- Para un satélite cuya carga útil se enciende continuamente, la disipación de energía a largo plazo del subsistema de control térmico varía con la energía total del satélite. Usualmente no será mayor del 12% de la energía total del satélite.

- Para un satélite cuya carga útil se enciende intermitentemente, la disipación de energía a largo plazo del subsistema de control térmico variará con la energía de la carga media y la tasa de servicio de la carga útil. Usualmente dicha disipación no será mayor que el 17% de la energía media del satélite.

- Se permitirá que el subsistema de control térmico tenga demanda de disipación de energía a corto plazo, según los requerimientos de los productos del satélite.

F. Número de Canales de Telemetría

El número de canales de telemetría del subsistema de control térmico cumplirá con los siguientes requerimientos:

- El número de canales de telemetría destinados al monitoreo de las temperaturas, voltajes, corriente, estados de encendido y apagado del subsistema de control térmico no excederá el valor permisible.

- El número y la distribución de los sensores de temperatura usados para monitorear otros sistemas y productos del satélite cumplirá los requerimientos generales del sistema del satélite.

G. Número de Comandos

El número de comandos necesarios para controlar los modos de trabajo de los productos del subsistema de control térmico, incluyendo telecomandos, comandos de control programados, etc, no excederá el valor permisible.

H. Vida Útil del Diseño

La vida útil del diseño del subsistema de control térmico deberá cumplir con los requerimientos del contrato.

XVII. PRODUCTOS DE CONTROL TÉRMICO

A. Requerimientos de Desempeño

El desempeño de los productos de control térmico deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

- El rango adaptable de temperatura de los productos de control térmico deberá cumplir con los requerimientos establecidos. Los rangos de temperatura de operación para los productos de control térmico incluyen el rango de temperaturas criogénico, el rango de temperatura baja, el rango de temperatura ambiente y el rango de temperatura alta.

- Los productos de control térmico serán compatibles con los requerimientos de prevención de contaminación establecidos, tales como los requerimientos de pérdida de masa total (TML) de los productos y de material condensable volátil recolectado (CVCVM).

B. Selección de Productos

La selección de los productos de control térmico seguirá los requerimientos listados a continuación:

- Los productos de control térmico y sus materiales, componentes y partes preferiblemente serán elegidos y comprados según el catálogo preferencial de selección indicado y la lista de fabricantes elegibles.

- Los productos de control térmico elegidos serán calificados a través de la validación de pruebas de calificación o demostrados en vuelo[2].

XVIII. INTERFACES

- Interfaces con el vehículo de lanzamiento.
- Interfaces con el sistema del sitio de lanzamiento.
- Interfaces con el sistema de telemetría y telecomando terrestre.
- Interfaces con los dispositivos de apoyo en tierra.
- Interfaces con el sistema del satélite.
- Interfaces mecánicas.
- Interfaces eléctricas.
- Interfaces con el subsistema de TT&C y manejo de datos.
- Interfaces con AOCS.
- Interfaces con el subsistema de carga útil.
- Otras interfaces.

XIX. ADAPTABILIDAD AL AMBIENTE

El ambiente encontrado por el satélite durante toda su vida útil será considerado, y se analizará la influencia del ambiente en el diseño térmico. Las medidas que pueden ser usadas son las siguientes:

- El diseño de los equipos de control térmico y su instalación se adaptará al ambiente de vibración e impacto durante el lanzamiento.

- Durante el período de pruebas en tierra antes del lanzamiento, pueden usarse medidas especiales tales como calefacción o enfriamiento para mantener el rango de temperatura de operación del componente.

- Para evitar el efecto dañino de la pluma cuando el propulsor está trabajando, puede usarse un aislante del calor.

- El diseño del caso caliente seleccionará los parámetros de desempeño degradados en el final de la vida útil, considerando la radiación solar ultravioleta, la radiación de la partícula eléctrica, y el ambiente de oxígeno atómico, etc, los cuales hacen que los recubrimientos de control térmico, el MLI y otras unidades de control térmico en el exterior se degeneren y dañen.

- Los productos de control térmico instalados en el exterior del satélite serán conectados a tierra a través de la estructura para evitar la descarga estática inducida por la carga de la superficie externa del satélite en el ambiente de plasma.

- El diseño de redundancia o los métodos de incrementar el espesor de los tubos, agregando capas de protección serán usados para tubos de calor y otros productos térmicos para evitar averías en el ambiente de micrometeoros y desechos espaciales.

- La pérdida de masa total de los equipos de control térmico será menor de 1%, y los materiales condensables volátiles recolectados serán menores que 0.1%. Se considerarán medidas preventivas para los equipos de control térmico que puedan causar fácilmente contaminación o sean sensibles a la contaminación. Las medidas preventivas de la soldadura en frío serán adoptadas para las partes móviles.

XX. COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

Métodos de diseño tales como conexión a tierra, solapamiento, disposición razonable de líneas, blindaje, aislamiento, etc, serán usados para hacer que la emisión y sensibilidad electromagnéticas de los dispositivos electrónicos de control térmico cumplan con los requerimientos de compatibilidad electromagnética.

XXI. DISEÑO DE LA CONFIABILIDAD

A. *Objetivo del Diseño de Confiabilidad*

Según los requerimientos cualitativos y cuantitativos especificados de confiabilidad, usar técnicas como diseño de confiabilidad, predicción de confiabilidad, análisis de confiabilidad, para encontrar puntos débiles así como para tomar acciones y medidas de mejora, y mejorar la confiabilidad de diseño.

B. *Principios de Diseño de Confiabilidad*

Los principios del diseño de confiabilidad son los siguientes:

- El esquema óptimo será obtenido balanceando el índice técnico incluyendo la función, desempeño, vida útil, peso, energía, confiabilidad y seguridad, y los requerimientos del costo y tiempo de desarrollo.

- Precondicionado al cumplimiento de los requerimientos del diseño térmico, el diseño será simplificado tanto como sea posible, y se deben disminuir las clases y la cantidad tanto de equipos como de programas de control térmico.

- Serán seleccionados en primer lugar el esquema técnico, los equipo y programas, y las técnicas con experiencias de vuelo. Se elegirán en primer lugar los equipos generales, seriales y ensamblados. Los productos térmicos con una estructura simple, sin partes móviles y sin consumo eléctrico serán seleccionados primero, tales como los recubrimientos de control térmico, MLI, tubos de calor con conductancia de calor constante, expansores térmicos y rellenos térmicos. Se usarán, bajo la condición de completar la verificación y la calificación mediante prueba, las técnicas, productos y procesos nuevos que pueden mejorar la confiabilidad.

- El diseño razonable de redundancia para los equipos y programas será usado para eliminar los puntos únicos de falla.

- Los componentes de los equipos electrónicos, eléctricos y mecánico-electrónico serán usados después de reducir la potencia. Será llevado a cabo un diseño de tolerancia de circuito y de prevención inmediata de sobrecarga en lugar de un diseño cargado y análisis de circuito latente para mantener el equipo operando de manera estable y confiable.

B. *Predicción de la Confiabilidad*

Se construirá el diagrama de confiabilidad y el modelo matemático de acuerdo con el diagrama funcional de la misión del subsistema de control térmico, de manera que se distribuya la confiabilidad del subsistema de control térmico. Según la tasa de fallas de los productos de control térmico y el modelo matemático de confiabilidad, la confiabilidad del subsistema de control térmico se puede predecir para encontrar el punto débil del diseño y mejorar el mismo.

B. *Análisis de confiabilidad*

De acuerdo al análisis del modo de falla, puede obtenerse la influencia de cada falla en el satélite y en el subsistema de control térmico. Según los grados de criticidad de los modos de falla, la probabilidad de aparición, la evaluación de riesgos, pueden decidirse y controlarse los artículos de confiabilidad críticos y pueden encontrarse los potenciales puntos débiles y medidas de mejora.

XXII. MANTENIMIENTO

Según los requerimientos cualitativos y cuantitativos de mantenimiento, y a través de la tecnología de la ingeniería como el diseño de mantenimiento, análisis, prueba, etc, debe asegurarse la reparación de los productos de control térmico en el tiempo promedio indicado.

- Siguiendo las reglas de diseño de mantenimiento del satélite, adoptar diseños tales como simplificación de reparación y operación, accesibilidad, seguridad y error preventivo, etc.

- Los equipos de control térmico serán cambiables. Cuando fallan elementos cambiables en tierra o en órbita, éstos se pueden reparar mediante desmontaje o cambio.

XXIII. SEGURIDAD

De acuerdo a los requerimientos de seguridad especificados y los métodos señalados a continuación, el peligro se puede reconocer y evaluar analizando la función, constitución, modo de operación y ambiente del subsistema de control térmico. La seguridad de la gente, del satélite, de las instalaciones y dispositivos en tierra será asegurada durante la manufactura, prueba, lanzamiento y proceso de operación por el diseño de seguridad para eliminar o controlar el peligro.

- El diseño de riesgo mínimo, diseño de tolerancia a fallas, diseño de seguridad de fallas, diseño del margen de seguridad y otros métodos serán adoptados para eliminar, reducir y controlar el peligro.

- Productos y materiales que liberen gases inflamables, venenosos y peligrosos, o que liberen contaminación no serán usados normalmente.

- Se adoptará un diseño que pueda garantizar la seguridad del circuito del calentador eléctrico.

- Hacer que la presión de operación de los tubos de calor se encuentre bajo un valor aceptable, y asegurar el fluido contra fuga y explosión.

- Los productos de control térmico en la superficie exterior del satélite tales como los recubrimientos de control térmico, MLI, etc,

serán conectados a tierra mediante la estructura para evitar daños por descarga electrostática.

XXIV. POSIBILIDAD DE PRUEBA

De acuerdo a los requerimientos de prueba especificados y los siguientes métodos, y a través del diseño de ingeniería durante el proceso de desarrollo, se implementará el chequeo y prueba de las funciones, desempeño, interfaces del subsistema de control térmico y sus productos.

- Los artículos de prueba (o los parámetros) y los artículos que no pueden ser probados (o los parámetros) serán decididos razonablemente.

- Se decidirá la condición, métodos y oportunidad de prueba de los artículos (o los parámetros) que puedan ser probados.

- Los artículos que no pueden ser probados (o los parámetros) serán clasificados y las acciones de control de calidad serán tomadas.

XXV. FASES DE DISEÑO

A. Fase de Factibilidad

Participar en la demostración de factibilidad del esquema del satélite, proponer el esquema de factibilidad del subsistema de control térmico. El trabajo principal es el siguiente:

- Investigar sobre el desarrollo de la tecnología de control térmico de satélites similares extranjeros.

- Investigar sobre el nivel técnico del control térmico doméstico y la condición básica relacionada (incluyendo los dispositivos de prueba de simulación térmica terrestres).

- Investigar sobre los posibles esquemas de control térmico y rutas técnicas a ser adoptados.

- Con base en el posible esquema de control térmico a ser adoptado, proponer la tecnología clave que requiere ser solucionada.

- Predecir el período y los gastos de desarrollo.

B. Fase de Definición Preliminar

Basado en los requerimientos de diseño preliminar, demostrar el esquema de control térmico del satélite. Las tareas principales son las siguientes:

- Determinar la configuración general del subsistema de control térmico.

- Decidir los posibles productos de control térmico a ser seleccionados.

- Decidir los requerimientos técnicos preliminares para el sistema y otros subsistemas.

- Estimar el número de canales de telemetría y de telecomandos.

- Estimar la masa y la disipación de calor del subsistema de control térmico.

- Ejecutar el análisis térmico preliminar, comparar y optimizar los esquemas de control térmico.

- Determinar los artículos y requerimientos de verificación de prueba.

- Ejecutar el análisis preliminar para la confiabilidad y los modos de falla del subsistema de control térmico.

- Abordar el problema de la tecnología clave.

C. Fase de Definición Detallada

Las tareas principales de la fase de definición detallada son las siguientes:

- Decidir la configuración de control térmico del modelo de ingeniería.

- Hacer el diseño de confiabilidad y seguridad del subsistema de control térmico.

- Hacer el análisis térmico de detalle.

- Desarrollar los productos preliminares y el equipo en tierra de control térmico.

- Probar en productos y componentes del subsistema de control térmico.

- Probar el desempeño del subsistema de control térmico en el modelo eléctrico del satélite, el modelo de estructura y el modelo térmico.

- Hacer la prueba de balance térmico del satélite o de los módulos.

D. Fase de Calificación y Producción

Las tareas principales de la fase de calificación y producción son las siguientes:

- Decidir la configuración de control térmico del modelo de vuelo.

- Hacer el análisis térmico del modelo de vuelo, incluyendo la corrección del modelo de análisis térmico después de la prueba de balance térmico y la predicción de la temperatura de vuelo, etc.

- Desarrollar los productos del modelo de vuelo y los dispositivos en tierra de las instalaciones de control térmico.

- Probar en los dispositivos y partes del subsistema de control térmico.

- Hacer la prueba de confiabilidad relacionada y evaluar la confiabilidad del sistema.

- Prueba de desempeño eléctrico del subsistema de control térmico en el modelo de vuelo.

- Hacer la prueba de balance térmico del modelo de vuelo del satélite.

- Decidir la configuración de control térmico final del modelo de vuelo.

E. Fase de Operación y Mejora

Después del lanzamiento, monitorear el desempeño del subsistema de control térmico, analizar y solucionar las fallas del subsistema de control térmico mientras el satélite se encuentra en órbita. Al final de la vida útil del satélite, el desempeño del subsistema de control térmico será completamente evaluado. El trabajo principal es lo que sigue:

- Decidir si la temperatura de cada posición se encuentra en el alcance establecido para la misión durante todo el proceso de operación del satélite.

- Evaluar el desempeño real de los equipos y programas de control térmico.

- Comparar los datos de telemetría con los resultados del análisis térmico.

- Comparar los datos de telemetría con los resultados de la prueba de balance térmico.

- Corregir el modelo de análisis térmico mediante los datos de telemetría.

- Brindar asesoramiento para la mejora de diseños de control térmico del satélite posteriores[1].

XXVI. REPORTE DE DISEÑO TÉRMICO DEL SATÉLITE

El reporte de diseño térmico del satélite debe describir los resultados del diseño de control térmico del vehículo espacial en detalle, incluyendo estados de control térmico particulares de cada parte. Los contenidos se muestran a continuación.

A. Superficie Exterior del Vehículo Espacial

Describe la posición y tamaño de las superficies de rechazo de calor, los tipos de recubrimientos de control térmico, planos y modo de instalación del MLI, y uso de otros productos de control térmico.

B. Superficie Interior del Vehículo Espacial

Describe el tipo y posición de las pinturas de control térmico de la superficie interior del vehículo espacial, y otros estados técnicos de control térmico.

C. Dispositivos Internos

Describe el carácter de la radiación en la superficie de dispositivos en el interior del vehículo espacial, y los requerimientos de las superficies de instalación. Suministra el tipo, posición y modo de instalación de tubos de calor usados para el rechazo de calor de los dispositivos. Describe el material, especificación y posición de los expansores térmicos. El diseño de aislamiento térmico de los dispositivos, uso de rellenos térmicos y los requerimientos de llanura de dispositivos y superficies de instalación, y otros estados técnicos de control térmico.

D. Dispositivos Externos

Describe el carácter de la radiación en la superficie de dispositivos en el exterior del vehículo espacial, los requerimientos de las superficies de instalación, y el diseño de aislamiento térmico de los dispositivos, etc.

E. Diseño Térmico de Dispositivos Especiales

Describe el estado técnico de control térmico de dispositivos espaciales, tales como antena grande, cámara, batería, tanque de propelente y tuberías, propulsores, etc.

F. Rango de Temperatura Predicha

Suministra el rango de temperatura predicha de casos típicos cuando el vehículo espacial y los dispositivos trabajan en órbita. El rango de temperatura predicha es la temperatura calculada sumando un margen de incertidumbre térmica. El margen de incertidumbre térmica debe ser dado.

G. Masa

Suministra la masa de cada producto de control térmico y la masa total del subsistema de control térmico.

H. Energía Eléctrica de los Calentadores

Suministra el consumo de energía eléctrica de cada calentador y de todo el subsistema de control térmico.

I. Número de Comandos de Control Remoto

Suministra el número de comandos de control remoto y la regla de distribución de cada comando en el subsistema de control térmico.

J. Número de Canales de Telemetría

Suministra el número de canales de telemetría para monitorear el modo de operación de los dispositivos de control térmico y la temperatura del vehículo espacial.

K. Confiabilidad, Seguridad, Grado de Mantenimiento y Compatibilidad Electromagnética (EMC)

Suministra el resultado del diseño de confiabilidad, diseño de seguridad, diseño del grado de mantenimiento, y diseño de EMC.

L. Resultados de Diseño de otros Requerimientos

Suministra los resultados de diseño de otros requerimientos[3].

XXVII. CONCLUSIONES

El diseño del subsistema de control térmico de un satélite tiene como objeto dimensionar y localizar los dispositivos de control térmico (MLI, OSR, tubos de calor, relleno térmico, persianas, aislantes, recubrimientos de control térmico, etc) en las zonas del satélite para de estar manera gestionar el intercambio de calor que se da entre el satélite y tanto el exterior como el interior del mismo. Esto se logra dirigiendo el calor generado en el interior del satélite por los dispositivos que lo componen hacia el radiador para luego irradiarlo al espacio exterior y al mismo tiempo minimizando el flujo de calor absorbido desde el espacio exterior. El subsistema de control térmico cumple su cometido si garantiza que los márgenes de temperatura de los equipos del satélite se mantengan dentro de los rangos operativos que permitan llevar a cabo el cumplimiento de la misión. Los documentos de control térmico generados como resultado del proceso de diseño indican todas las características y detalles de importancia del subsistema e incluyen el procedimiento de instalación de los dispositivos que lo componen durante el proceso de ensamblaje e integración del mismo. La validación del diseño térmico se hace principalmente a través de dos vías: el análisis térmico (analítica) y la prueba de balance térmico (experimental), de manera tal de corroborar la validez del modelo térmico empleado y el desempeño esperado del subsistema a lo largo de la vida útil del satélite.

XXVIII. REFERENCIAS

- [1] Guideline for satellite thermal design, CASTSS-E-105, 2014.
- [2] General specification for satellite thermal control subsystem, CASTSS-E-106, 2014.
- [3] Design of Satellite Thermal Control Subsystem, China Academy of Space Technology (CAST), Beijing, BJ, pp. 4, 8 - 11, 14 - 15, 25 - 35.
- [4] Space engineering: Thermal control general requirements, ECSS-E-ST-31C, 2008.