

Diseño, construcción y pruebas de un sistema de arranque para el experimento articulado de control en un plano

IGNACIO ROMERO TRUJILLO

RESUMEN

Este artículo presenta un sistema de arranque para el Experimento Articulado de Control en un Plano (PACE), del Laboratorio Phillips, Base de las Fuerzas Aéreas de EE.UU., California. Este proyecto nace de la necesidad de incorporar un sistema de arranque para mantener el brazo flexible deformado con una fuerza conocida perpendicular al brazo. Se presenta el diseño del sistema de arranque, la construcción y pruebas, y el diseño final. Como conclusión se ofrece una evaluación de todo el sistema.

ABSTRACT

The design, construction and testing of a starting mechanism for the planar articulated control experiment

This report presents a starting mechanism for the Planar Articulated Control Experiment (PACE) by the Phillips Laboratory at the U.S. Air Force Base in California. This project was born from a need to incorporate a starting system to maintain a flexible arm deformed by a known force perpendicular to the arm. The report presents the design of the starting system together with its construction, testing and final design. An evaluation of the whole system is given in conclusion.

INTRODUCCIÓN

L el desarrollo de teorías para modelar y controlar estructuras flexibles en el espacio ha sido una de las áreas de estudio intensivo desde los años cincuenta. Para reducir el peso de los elementos puestos en órbita, los componentes de muchos de los satélites y de las naves de exploración enviadas desde entonces se han diseñado flexibles: así sucede con las antenas de comunicaciones y con los paneles solares que se despliegan una vez que el vehículo ha alcanzado la órbita indicada (Fig.1).

Cuando resulta necesario cambiar la posición de uno de estos componentes hay que saber cuál va a ser el comportamiento de toda la estructura: debido a la aplicación de una fuerza o rotación para mover el componente y dada la flexibilidad de la estructura, los problemas de vibraciones indeseadas son considerables.

La precisión necesaria en el control de un vehículo espacial es muy alta, ya que un fallo de cualquiera de los componentes de a bordo puede suponer perder la misión y, por tanto, altas cantidades de dinero, años de preparación y el retraso de cualquier otra misión posterior. Hoy en día, con la posibilidad de enviar vehículos espaciales cada vez más grandes y con el aumento de su tamaño y del número de partes flexibles que lo componen, el problema de poder controlar el vehículo con exactitud es fundamental para poder continuar con éxito la exploración espacial.

Por otro lado, con el diseño en EE.UU. de la estación espacial **FREEDOM** (Fig.2), ahora llamada **ALPHA**, la importancia de entender su comportamiento y de poder controlar grandes estructuras flexibles se ha convertido en un área fundamental de investigación, para así poder garantizar la integridad y la seguridad de la estación y la de sus astronautas. Debido a la naturaleza de **ALPHA**, –un tamaño considerable y la necesidad de que el transbordador espacial la visite periódicamente para suministrar provisiones y cambiar el personal de a bordo–, las posibilidades de excitar la estructura de forma indeseada resulta muy elevada. Choques de micrometeoritos, fallos del sistema estructural, choques del transbordador espacial contra la estación y un largo etcétera podrían causar que la estación espacial empezara a vibrar de tal forma que los métodos de control normalmente usados en un vehículo espacial (propulsores de hidrógeno o ruedas acumuladoras de momento, entre otros) no resulten suficientes como para mantener la orientación correcta de la estación en órbita y que el conjunto com-

pleto se pudiese a rotar en el espacio sin posibilidad de control y se terminara perdiendo la estación.

Por todas estas razones, el estudio en profundidad de las estructuras flexibles resulta muy necesario. Hasta hace poco tiempo, la única forma de demostrar y probar nuevas teorías sobre el comportamiento de las estructuras flexibles era usar un ordenador que simulara las condiciones que se esperan aparezcan cuando la estación se encuentra en órbita. El brazo flexible PACE, construido en el laboratorio Phillips de la base Edwards de las Fuerzas Aéreas de EE.UU., introduce un sistema físico (Fig.3) para poder probar y demostrar las teorías de control de cuerpos flexibles por medio de motores entre las secciones flexibles logrando, de esta forma, aislar las excitaciones de una parte de la estructura sin que éstas se extiendan por todo el sistema.

PACE consiste en una multiestructura con dos secciones flexibles de aluminio conectadas en serie con motores en el «hombro» y en el «codo» del sistema. La multiestructura se pue-

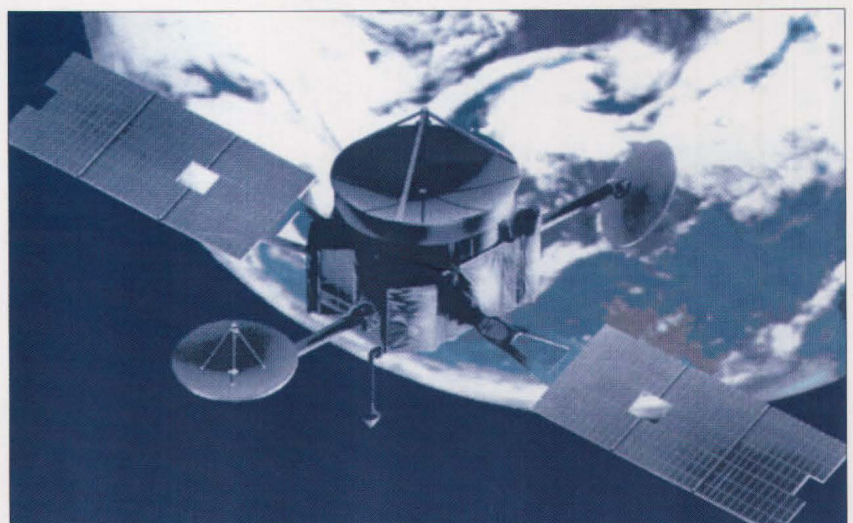


Fig. 1: Un satélite en órbita con paneles solares desplegados.

de mover en un plano encima de una mesa de granito de 4,30 por 4,30 metros. Un compresor activa un cojinete de aire que permite que todo el sistema flote encima de la mesa de granito de tal forma que la fricción entre la estructura y la mesa resulte mínima. El motor del hombro está fijo en el centro de la mesa y el del codo está en la unión de las dos secciones de aluminio. Por lo tanto, el brazo puede ser dirigido alrededor de la mesa por los dos motores.

Para poder realizar experimentos efectivos con PACE es necesario poder simular condiciones iniciales diferentes a la de reposo. Actualmente el sistema está limitado a que el reposo sea la única posible condición inicial: a partir de esa condición se pueden usar los motores para excitar la estructura y después controlarla. Pero el utilizar los motores para excitar la estructura introduce incertidumbre en el experimento. El problema surge porque es muy difícil llegar a comprender la interacción entre los motores y las secciones flexibles del

experimento. Por lo tanto, es importante incluir, junto con el experimento, un mecanismo que permita obtener condiciones iniciales en las cuales el brazo flexible esté deformado.

Manteniendo el brazo deformado con una fuerza en tensión en el extremo de éste, hasta el momento que el investigador decida comenzar el experimento, se consigue simular la posibilidad de un choque con la estructura flexible y la reacción de ésta. Por otro lado, el poder mantener el brazo deformado permite medir la curvatura del mismo con una mayor exactitud que si el brazo está en movimiento.

Esto último resulta muy importante ya que mantener el brazo flexible deformado aísla el modelo estático del brazo, de tal forma que la energía potencial asociada con tener el brazo deformado con una curvatura particular se puede usar para obtener el modelo flexible de los segmentos del brazo. Usando un método en la actualidad en desarrollo por Junkins y McVay en el Departamento de Ingeniería

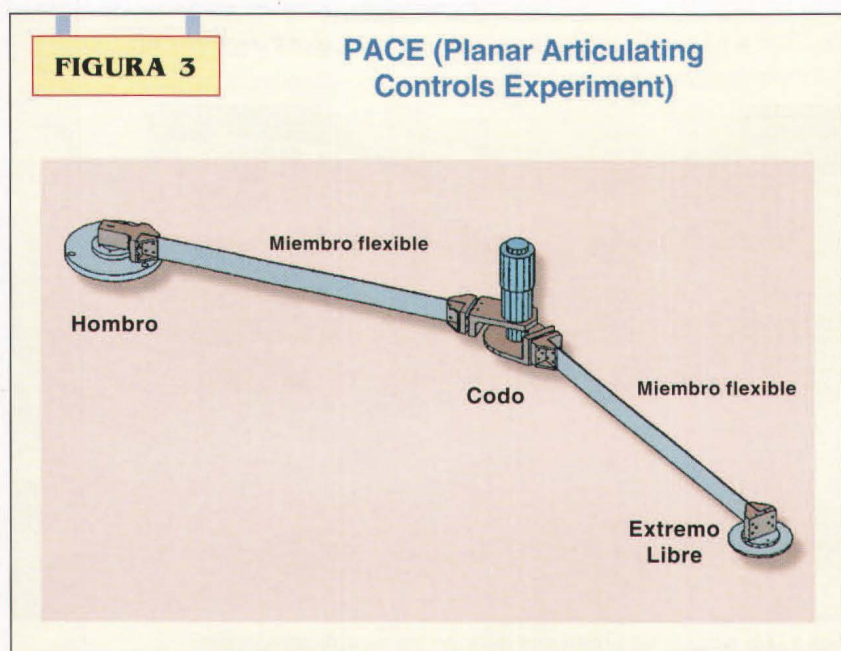
Aeroespacial de la Universidad Texas A&M, se pueden tomar familias de deformaciones y las fuerzas en tensión asociadas con ellas, con objeto de producir un modelo matemático de estos segmentos flexibles del brazo.

Una vez que el modelo de los segmentos flexibles ha sido producido, el brazo se pone en movimiento y se vigila la reacción de éste alrededor de la mesa, utilizando un haz de láser que reproduce la trayectoria del brazo en un ordenador. Estudiando el comportamiento del brazo, con respecto a distintas deformaciones, se obtiene un modelo dinámico del mismo. Por último, los motores se usarán cuando el brazo esté en movimiento para intentar controlarlo: de esta forma los efectos en la dinámica del brazo, al usar los motores, puede ser completamente evaluada.

Cuando se hayan concluido todos los estudios iniciales necesarios ya descritos, el mecanismo de arranque se usará para deformar el brazo, soltarlo y comparar el comportamiento con las nuevas teorías sobre estructuras flexibles o con diferentes algoritmos de control, con objeto de alcanzar el fin perseguido: llevar la estructura a una situación de reposo.

REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE ARRANQUE

El sistema que mantiene la deformación del brazo flexible y que determina la fuerza perpendicular, es el «Sistema



de Arranque». Este aparato tiene que satisfacer las siguientes condiciones:

1. Determinar la fuerza asociada con mantener el brazo deformado.
2. No interferir con la dinámica del brazo.
3. No dañar la mesa de granito.
4. Poder removerse de la superficie de la mesa, rápidamente.
5. Soltar el brazo flexible «limpiamente» y en el momento preciso.

La dinámica del brazo está bien definida alrededor de la mesa (Fig. 4), ya que el hombro está fijo en el centro de la mesa y el brazo solamente puede rotar 360 grados alrededor de este punto fijo. Una vez que el brazo se pone en movimiento, el mecanismo de arranque tiene que ser retirado del plano de acción de éste para que los dos no choquen.

Una condición muy importante radica en no dañar el acabado de la mesa de granito que ha sido pulida muy finamente para reducir la fricción con los cojinetes de aire del brazo flexible. Para prevenir cualquier daño, la superficie de contacto del mecanismo de arranque con la mesa es de goma flexible.

Es muy difícil estimar de cuánto tiempo se dispone para retirar el mecanismo, puesto que no se pueden prever de antemano todas las posibles configuraciones. Por lo tanto, el tiempo de retirada se ha intentado minimizar al máximo.

Soltar el brazo «limpiamente» implica que no se puede introducir ninguna fuerza ni momento indeseado, en el instante en que el brazo se empieza

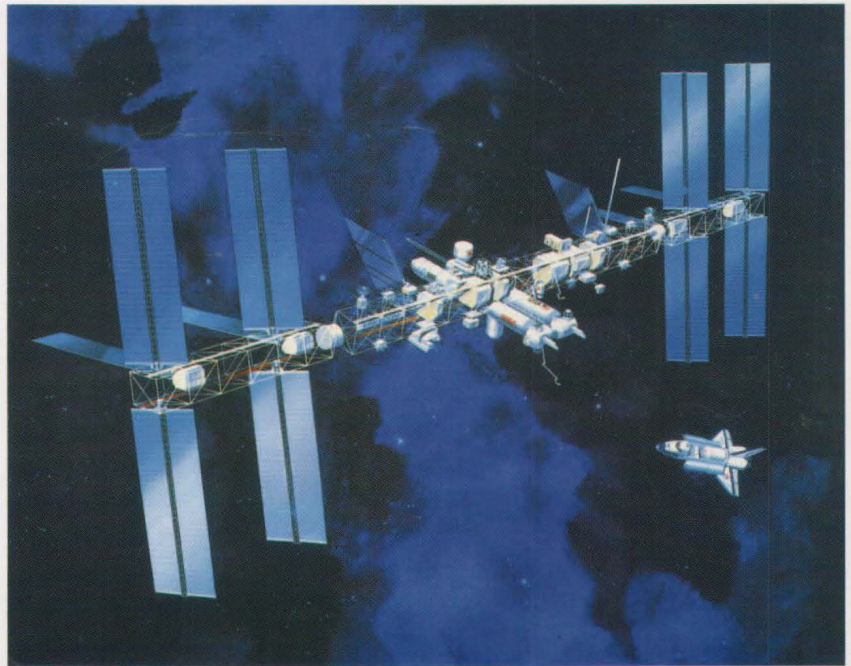


Fig. 2: Estación espacial ALPHA.

a mover. Es fundamental que se pueda asumir que solamente existe una fuerza perpendicular al brazo flexible, para poder comparar los resultados experimentales con las simulaciones en el ordenador. Este requerimiento incluye dos facetas distintas: una, que es determinar la fuerza perpendicular, y otra, que es garantizar la perpendicularidad de dicha fuerza.

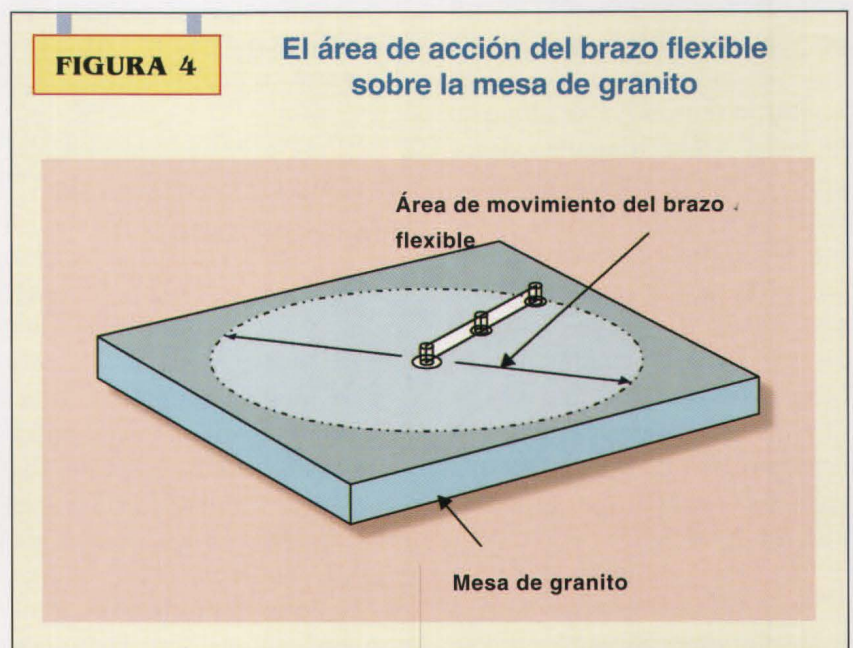
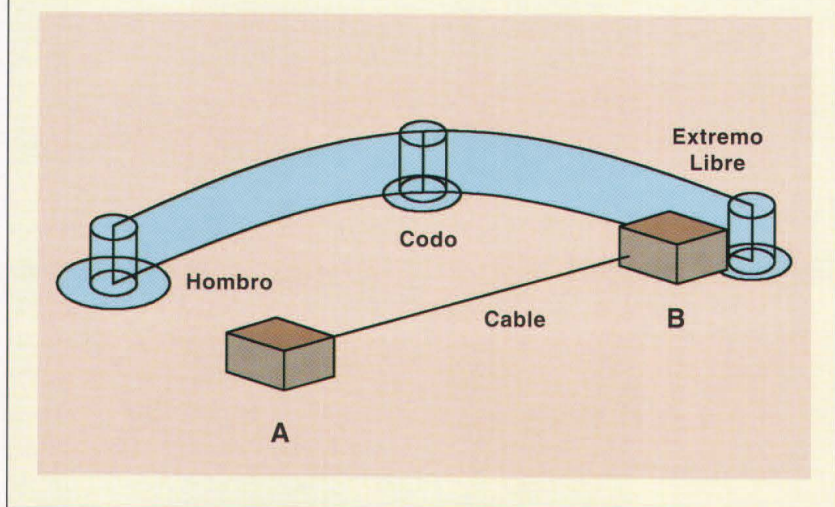


FIGURA 5

Dibujo esquemático del sistema de arranque con el brazo flexible



DISEÑO DEL APARATO

El sistema de arranque consta de dos partes, ilustradas en la figura 5, unidas por un cable flexible: así se consigue una forma muy segura de garantizar que la fuerza que se está usando para aguantar el brazo es perpendicular al mismo, ya que un cable flexible no puede soportar ninguna fuerza salvo en tensión, nunca en compresión ni perpendicularmente a él.

Por lo tanto «A» se ubica en la mesa a una distancia apropiada, «B» se sujeta al brazo flexible y se permite que el cable se establezca en una configuración de pura tensión hasta posicionar «B» en la mesa. En el momento adecuado «B» libera el brazo flexible, «A» y «B» se sueltan de la mesa y se separan del plano de la misma para no interferir con el movimiento del brazo.

Para que el diseño conceptual se pudiera llevar a cabo se

ha tenido que investigar diferentes formas de sujetar todo el sistema a la mesa de granito así como la de asegurar el brazo al sistema. Los dos elementos «A» y «B» necesitan adherirse a la mesa de granito y «B» necesita enlazar el brazo flexible y determinar la fuerza con la que se le está sujetando. Obviamente los dos componentes comparten los mismos elementos: Por lo tanto los diseños de «A» y de «B» se han consolidado en uno sólo, por simplicidad, y a lo largo de este artículo el «Sistema» se refiere a las dos partes en conjunto.

Sistema de sujeción a la mesa de granito

La mesa de granito, como ya quedó indicado, no se puede dañar o cambiar de ninguna forma. El terminado de la mesa se necesita intacto para que los cojinetes de aire del brazo flexible se deslicen sobre la mesa sin ningún problema. Tampoco se puede dejar sobre la mesa ningún tipo de residuo. Debido a

las limitaciones descritas, el sistema usará una bomba de vacío para crear una diferencia de presión entre «A» y «B», logrando así que las dos partes no se deslicen alrededor de la mesa cuando están sujetando el brazo flexible. Se necesita que el sistema sea capaz de soportar 100 libras de fuerza (445 Newtons), en paralelo con la mesa, pero la única forma de cuantificar la efectividad de una implementación sobre otra ha sido ir probando todas las combinaciones en el laboratorio. Finalmente, se usará una serie de ventosas a las que, tras haberlas perforado, se conectan tubos flexibles unidos a una bomba de alto vacío (13-15 psi). Una combinación de cuatro ventosas ha sido elegida para el diseño final por razones de estabilidad. El sistema ha sido probado y confirmado hasta 120 libras de fuerza (534 Newtons), colgando pesos de uno de los extremos con la bomba de vacío activada.

Sistema de sujeción del brazo flexible al sistema de arranque

El brazo flexible ha de estar sujeto al sistema de arranque de una forma que permita romper la unión de forma cuasi-instantánea y lo más «limpia» posible. La decisión final elegida incorpora un electroimán al sistema para sujetar el brazo firmemente. Una vez iniciado el experimento, se interrumpe la corriente eléctrica al electroimán y se suelta el brazo sin impartir ninguna fuerza externa indeseada. Para que el electroimán funcione correctamente se unirá un pequeño disco

de acero al extremo libre del brazo de aluminio, ya que el aluminio no se puede usar como superficie de contacto con el electroimán. Cuando la corriente está conectada, el electroimán genera un campo magnético y se adhiere al disco de acero; pero dicho campo magnético no se interrumpe completamente cuando se desconecta la corriente. Para garantizar que cuando la corriente se desconecte se interrumpa de inmediato la fuerza de sujeción, se ha aplicado una capa de pintura de una milésima de pulgada al disco de acero, creando así un espacio físico entre el disco y el electroimán. Al introducir un espacio entre las dos partes, la fuerza magnética residual en el sistema se elimina y el disco se separa instantáneamente del electroimán cuando se interrumpe la corriente.

Diseño para medir la fuerza que soporta el sistema de arranque

Usando un medidor de deformación (*strain gage*), adherido a un elemento de acero de conocidas características físicas, se pueden obtener mediciones bastante exactas de fuerza en relación con la deformación del elemento conocido. El medidor de deformación no es nada más que un elemento eléctrico muy fino y de pequeñas dimensiones que al deformarse el acero, al que está adherido, se deforma también, provocando un cambio en la resistencia de ese componente eléctrico. De esta forma, si se hace pasar una corriente constante y se produce un cambio en su resistencia, se pueden medir las fluctuaciones

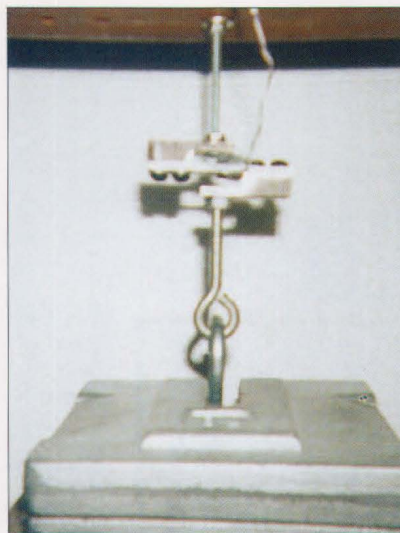


Fig. 6: Calibración del medidor.



Fig. 7: Prototipo I.



Fig. 8: Prototipo II.

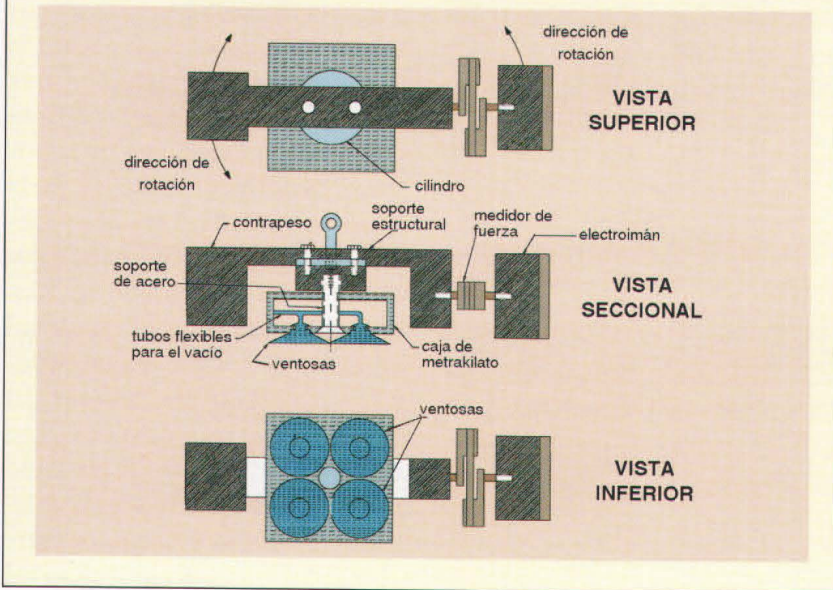
de la corriente y averiguar la fuerza en libras o Newtons que el sistema está soportando. Existen medidores de este tipo, de carácter industrial, con precisiones muy altas, que permiten la medición de fuerzas en tres dimensiones. Se ha recomendado que se use uno de estos medidores profesionales en la implementación final del sistema de arranque pero, como ejercicio, se ha construido un medidor de fuerza unidireccional en el laboratorio para incorporarlo al sistema de arranque. El medidor se ha construido de acero con un «*strain gage*» adherido para detectar la deformación del acero. El medidor se coloca entre el electroimán (que sujeta el brazo) y el resto del aparato unido a la mesa.

Para calibrar el medidor se le han colgado pesos conocidos (Fig.6) y se han construido varias de sus curvas de calibración. De esta forma, las fluctuaciones de la corriente cuando pasa por el «*strain gage*» se relacionan con la fuerza que está soportando el medidor.

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Para las pruebas prácticas de todos los elementos descritos con anterioridad se han construido dos prototipos: la figura 7 presenta el prototipo I y la figura 8 presenta el prototipo II. El prototipo II fue el finalmente elegido para este proyecto. En él se han incorporado todos los elementos y se han realizado pruebas de comprobación en el laboratorio. La figura 9 presenta

FIGURA 9 El prototipo II del sistema de arranque

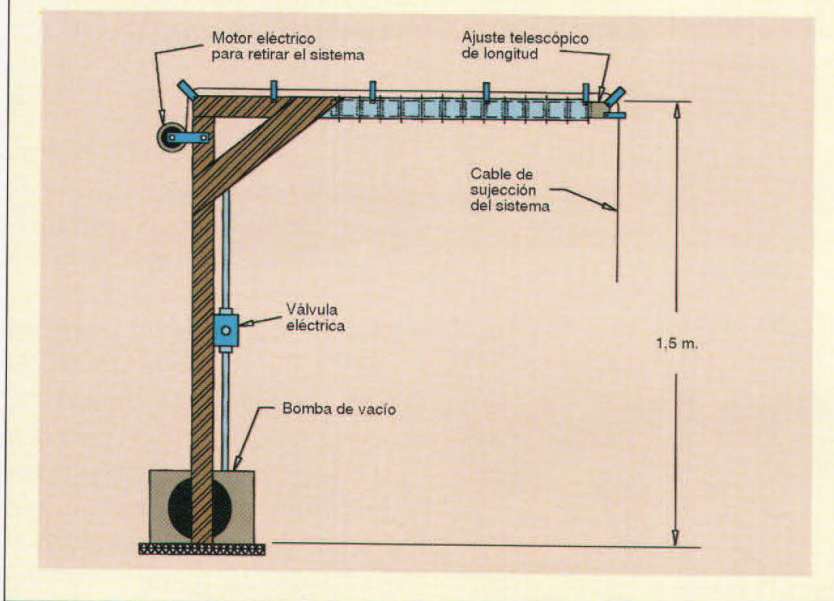


un dibujo esquemático con todas las partes reseñadas.

Como se puede apreciar en las figuras 8 y 9, el prototipo final está diseñado con una base de metacrilato, soportes y estructura de acero y un cilindro de aluminio que puede rotar encima de la caja de metacrilato.

En la figura 9 se aprecia la dirección de rotación del soporte estructural en donde el electroimán está unido; esta condición de movilidad se le ha incluido al sistema para que la «cara» del electroimán pueda ajustarse alrededor del punto de adhesión a la mesa de granito sin tener que remover las ventosas.

FIGURA 10 La estructura de retirada del sistema de arranque



Por la parte inferior de la base de metacrilato se insertan las ventosas que tienen «cabeza de champiñón», con lo cual se quedan sujetas como se puede apreciar en la «vista seccional» de la figura 9. De lo contrario, con ventosas de cabeza plana, no habría forma de mantenerlas adheridas a la base excepto con un adhesivo y no se podrían cambiar en caso de ruptura. Dentro de la base se encuentran los tubos flexibles interconectando las cuatro ventosas y conectados a su vez a un tubo exterior (este último se puede apreciar en la figura 8), que va conectado a una válvula eléctrica y a la bomba de vacío.

La válvula eléctrica se encuentra normalmente cerrada y se abre por medio de un interruptor para igualar la presión del tubo flexible con la presión ambiental y liberar el sistema de arranque de la mesa de granito después de que el brazo ha sido soltado por el electroimán. Esta operación de equilibrar las presiones se convierte en fundamental ya que no se puede retirar el sistema sin soltar las ventosas y, como ya se ha expuesto, hay que minimizar el tiempo de retirada de todo el sistema de la mesa. Con la válvula actual se pueden soltar las ventosas en menos de un segundo y medio, con la utilización de un tubo flexible de unos tres metros. Este método para soltar las ventosas se ha considerado adecuado, pero queda el problema de retirar el sistema de la mesa automáticamente y de la forma más rápida posible.

Para lograrlo se utiliza la anilla que se encuentra en la parte superior del prototipo, ver figuras 8 y 9, y tirar de él para levantarlo de la superficie de la mesa

hasta una altura adecuada que imposibilite el choque entre el brazo flexible y el sistema de arranque. La figura 10 presenta la estructura encargada de levantar el sistema de arranque de la mesa. Esta estructura es una pequeña «grúa», construida de acero, con el miembro horizontal de longitud variable que permite alcanzar diferentes partes de la mesa de granito y colocar el sistema de arranque en la posición que el investigador considere necesaria. La grúa contiene todos los elementos que completan el diseño del sistema

de arranque: un motor eléctrico para retirarlo de la mesa (por medio de un cable amarrado a la anilla anteriormente indicada), la bomba de vacío y la válvula eléctrica.

CONCLUSIONES

El diseño de un sistema de arranque ha sido completado y comprobado con la construcción del prototipo II. Este prototipo

final no representa el sistema de arranque en su totalidad, pero ha servido como base de pruebas para el diseño de todas las secciones del mismo. El Sistema de Arranque en su condición final, que será construido a partir del diseño producido en este proyecto, se incorporará al Experimento Articulado de Control en un Plano (PACE), en los Laboratorios USAF Phillips, Edwards AFB, California, contribuyendo así a avanzar en el estudio del control de estructuras flexibles, con aplicaciones en futuras exploraciones espaciales.

REFERENCIAS

- Junkins, J.L.; Kim, K.** (1993): *Introduction to Dynamics and Control of Flexible Structures*, AIAA Education Series, Washington, DC.
- Kirk, C.L.; Junkins, J.L.** (1990): *Dynamics of Flexible Structures in Space*, Computational Mechanics Publications Springer Verlag, Boston, MA.
- Matlab**, (1993): The MathWorks Inc. Boston, MA.
- Matrix**, (1991): Integrated Systems Inc. Santa Clara, CA.
- Kwak, M.K.; Smith M.J., Das.,** «PACE: A Test Bed for the Dynamics and Control of Flexible Multibody Systems», USAF Phillips Laboratory, OLAC PL/VTSS, Edwards AFB, CA.
- Parker Oring Handbook*, Parker Hannifin Corporation, Cleveland, OH, 1992.
- Science First Inc., Buffalo, NY, 1994.
- Omega Engineering (1992): *The Pressure Strain and Force Handbook*, Omega Engineering Inc., Stamford, CT.

BIOGRAFÍA

Ignacio Romero Trujillo

Nació en Las Palmas de Gran Canaria. EGB y Bachillerato en el Canterbury School, Las Palmas de Gran Canaria. Primer Curso de Ingeniería en la Facultad de Ciencias del Bunker Hill Community College, Boston, MA. Licenciado en Ingeniería Aeroespacial por Texas A&M University, EE.UU., (Mayo 1993). Master de Ciencia en Ingeniería Aeroespacial por Texas A&M University, EE.UU. (Diciembre 1994). Interesado en la dinámica y control de vehículos espaciales y de estructuras flexibles en el espacio.

Actualmente reside en Cranfield University, Gran Bretaña, preparando el doctorado en Astronáutica e Ingeniería Espacial en el estudio de un brazo flexible en la estación espacial internacional Alpha.

Dirección:
57 K Shakespeare Road
Bedford. MK40 2DX
Inglaterra
Tfno: (44)234-212892
e-mail: 74764.546 compuserve.com

Este trabajo ha sido patrocinado por
AYUNTAMIENTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
y
UNIÓN ELÉCTRICA DE CANARIAS, S.A. (UNELCO)