

01/29  
22



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**SISTEMA DE ACTUADORES NEUMATICOS PARA ESPEJOS  
DE MEMBRANA**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERA ELECTRICA ELECTRONICA**  
**P R E S E N T A :**  
**DOLORES ALEJANDRA FERREIRA DE LOZA**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. ELFEGO RUIZ SCHNEIDER**



**MEXICO, D. F.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**2003**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

*A mis padres*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo intelectual.

NOMBRE: Florencia de Loza

Dolores Alejandra

FECHA: 23-05-03

FIRMA: Dolores Alejandra (D)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

*Agradecimientos*

A Imelda de Loza, mi madre –tirana por naturaleza – que jamás se rinde, la más inspiradora de mis musas. A Rigoberto Ferreira, mi papá, por dejarnos unidos y llenos de gratos recuerdos.

A Lucy y Fer, por todos estos años de convivencia: a Fer porque se enoja pero no abandona; a la peque Lucy, por sus manos que curan y brindan consuelo. A mi *madrina Lola*, abogada y cómplice en nuestra infancia.

Al Instituto de Astronomía de la UNAM y al Proyecto TIM, al Dr. Elfeego Ruíz siempre dispuesto a compartir su conocimiento, por su paciencia y por la pasión con la que realiza su trabajo.

Al Fondo TIM y al PROBETEL, por el apoyo otorgado para la realización de esta tesis.

A todos los hum@nos – vivos y muertos – que en los libros y en los pasillos me han iluminado con sus ideas. Entre ellos a mis camaradas de ingeniería. En especial a Gabriel López por compartir conmigo la *teoría de la coincidencia*.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo aprendido y experimentado en este tiempo.

# Índice

## TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Presentación .....	3
1 Telescopios .....	5
1.1 Radiación Electromagnética .....	6
1.1.1 Espectro Electromagnético .....	6
1.1.2 Limitantes de la Detección .....	7
1.2 El Telescopio .....	7
1.2.1 Tipos de Telescopios .....	8
1.2.2 Calidad de la imagen .....	11
1.2.3 Partes de un Telescopio Óptico .....	12
Monturas .....	13
Espejo Primario .....	13
I. Espejos monolíticos .....	14
II. Espejos huecos .....	14
III. Espejos de menisco .....	14
IV. Espejos segmentados .....	14
V. Espejos segmentados flexibles .....	15
Espejo secundario .....	15
1.2.4 Telescopios de nueva tecnología .....	17
1.2.5 Telescopios del futuro .....	19
Bibliografía y referencias .....	20
2 Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano TIM .....	21
2.1.1 Óptica y Control .....	22
I. Sistema de suspensión .....	25
II. Sistema de posicionamiento .....	26
III. Sistema de alineación .....	26
2.1.2 Sistema de control distribuido .....	27
2.1.3 Mecánica .....	29
2.1.4 Observatorio .....	30
Bibliografía y referencias: .....	31

3 Espejos Flexibles .....	33
3.1 Interacción de los actuadores con el espejo .....	34
3.1.1 Diseño Conceptual .....	36
3.1.2 Desempeño de los espejos. ....	37
3.1.3 Materiales .....	39
3.1.4 Acoplamiento de los segmentos al espejo primario .....	41
3.2 Tecnologías para el soporte de los segmentos .....	42
I. Soportes puntuales .....	42
II. Soportes distribuidos .....	42
III. Soportes continuos .....	43
Bibliografía y referencias .....	45
4 Amplificador Multiplexor Fluido .....	47
4.1 Funcionamiento básico .....	48
4.2 Etapa neumática .....	50
4.2.1 Circuito neumático .....	50
4.2.2 Electroválvulas .....	51
4.3 Etapa electrónica .....	53
4.3.1 Multiplexado y decodificación (selección del actuador) .....	56
4.3.2 Conversión Analógica Digital .....	56
4.3.3 Modulación de Ancho de Pulso .....	58
4.3.4 Sensado y acondicionamiento de las señales .....	59
4.3.5 Encendido de las electroválvulas .....	62
4.4 Polarización del MAF .....	63
4.5 Pruebas y Resultados .....	64
4.6 Versión final .....	65
Bibliografía y Referencias .....	66
Conclusiones .....	67
APENDICE A .....	69
APENDICE B .....	83

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# Presentación

## TESIS CON FALLA DE ORIGEN

En la UNAM se diseña el Telescopio Óptico Infrarrojo de nueva tecnología TIM, para el que se buscan soluciones alternativas con el fin de mejorar la calidad de las imágenes y disminuir los costos de su construcción.

En un telescopio, el elemento mas importante es el espejo primario donde se colecta la información que recibimos del Universo, con diámetros mayores es posible observar objetos más débiles y lejanos. El reto constante para científicos e ingenieros ha sido incrementar el diámetro de los telescopios, sin embargo no basta con construir espejos mayores es necesario compensar y mantener las superficies ópticamente uniformes, debido a la longitud de onda que se observa, errores del orden de nanómetros afectan la calidad de la información, por esta razón, un conjunto de actuadores y sensores integrados en el control activo se encarga de esta tarea.

Otra de las metas en el diseño de un telescopio es disminuir el espesor de los espejos y con esto el peso total del sistema, sin embargo, un espejo delgado o membrana carece de rigidez y se vuelve susceptible a los efectos dañinos del viento, por lo que se requiere aumentar el número de actuadores necesarios para soportarlo y manipularlo incrementándose la complejidad del control, el peso y los costos, por esta razón los espejos de membrana solo se han implementado en el espacio. Los *Espejos Flexibles*, un nuevo concepto diseñado por el Dr. Elfege Ruiz del IAUNAM, con un espesor mucho menor emplean un número equivalente de actuadores que utilizaría un menisco de las mismas dimensiones. sus características los hacen ideales para aplicaciones adaptativas y son una alternativa para los telescopios gigantes que ya se están diseñando.

El objetivo de esta tesis es diseñar un sistema que controle la presión en los actuadores de un espejo flexible y que cumpla con las necesidades de ancho de banda de la óptica activa. El primer capítulo es una introducción a los telescopios y los nuevos avances tecnológicos para mejorar la calidad de las imágenes desde la Tierra. El capítulo dos es una breve descripción del proyecto TIM. En el capítulo tres se presentan los Espejos Híbridos y una síntesis de los resultados obtenidos mediante la simulación por elemento finito. El capítulo cuatro trata sobre el diseño y funcionamiento del Sistema Amplificador Multiplexor Fluido. Por último se presentan las conclusiones de la tesis.

1947  
MAY 1947

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## 1 Telescopios

Los primeros testimonios astronómicos registrados datan del hombre de Cromagnon, 25000 años antes de la invención de la escritura. Es hasta el siglo XVII que se utiliza el primer telescopio, desde entonces el reto constante para científicos e ingenieros ha sido mejorar e incrementar la calidad de la información que recibimos del Universo. Dado que nuestro intervalo de visión esta en el llamado óptico, es en la banda en la que más investigación se ha llevado a cabo, no obstante, gracias a los detectores hoy existen telescopios para prácticamente todas las bandas del espectro electromagnético.

En este capítulo se describen el funcionamiento y estructura del telescopio, se presentan los problemas para la observación desde un telescopio infrarrojo terrestre así como las innovaciones implementadas en los telescopios de nueva tecnología cuyo objetivo es alcanzar la resolución angular ideal de un telescopio desde la superficie terrestre aplicando técnicas de control activo y adaptativo, al mismo tiempo se desarrollan alternativas tecnológicas para la construcción de espejos más ligeros y de mayor diámetro.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.1 Radiación Electromagnética

Energía propagada en forma de ondas, tiene su origen en las vibraciones del campo eléctrico y del campo magnético. Una onda electromagnética es una propagación autosostenida del campo eléctrico perpendicular a un campo magnético. En el espacio vacío las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad de  $c=2.99 \times 10^8$  km/s, conocida como velocidad de la luz. La radiación electromagnética puede describirse como onda por medio de las ecuaciones de Maxwell o como partícula por medio de la mecánica cuántica, todo depende de cómo se interactúe con ella.

### 1.1.1 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético tal como lo conocemos se muestra en la *Figura 1.1*. Se encuentra dividido en diferentes bandas o regiones dependiendo de su longitud de onda y por tanto de la tecnología que se requiere para detectarlas, cada una de estas regiones de energía se origina por distintos fenómenos. El estudio de las diferentes bandas del espectro permite conocer los procesos que se realizan a nivel estelar, por lo que es importante hacer observaciones en todo el espectro para obtener un conocimiento más completo de los mismos. Las radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja son ocasionadas por cambios en los niveles de energía de las envolturas electrónicas de los átomos; por otro lado los rayos gama y los rayos x fuertes son producidos por transiciones en el núcleo atómico o en interacciones de partículas elementales.

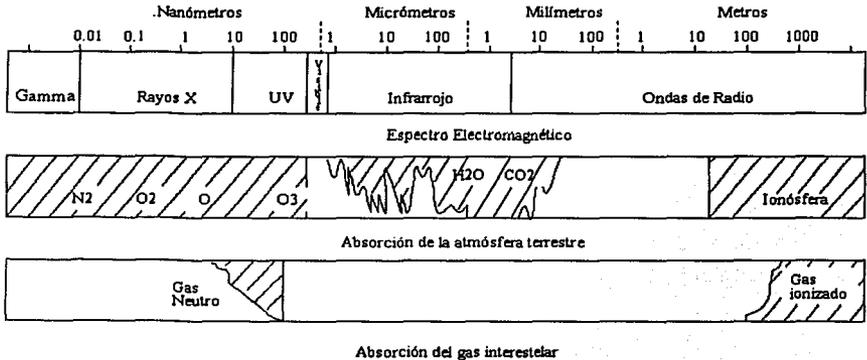


Figura 1.1 Espectro electromagnético y absorción de la atmósfera y gas interestelar.

### 1.1.2 Limitantes de la Detección

Teóricamente no existen límites en longitud para una onda electromagnética, puede ser del tamaño del universo. Sin embargo, para fines de observación existen restricciones del medio tanto en telescopios terrestres como espaciales.

#### Terrestres

La atmósfera debido a sus propiedades de absorción, dispersión y turbulencia limita la capacidad de realizar mediciones científicas en algunas longitudes de onda, como se observa en la *Figura 1.1*. Existe la llamada ventana óptica que abarca las longitudes de onda del visible de 300 – 800 nm, otras longitudes son absorbidas impidiendo su detección desde la tierra. Es el caso de la radiación ultravioleta, absorbida por el ozono de las capas superiores y de algunas frecuencias de radio absorbidas por la ionósfera. Los telescopios espaciales permiten el estudio de estas bandas. En el cercano infrarrojo la atmósfera es parcialmente transparente hasta 1.3  $\mu$ , existen algunos cinturones de absorción causados por agua y oxígeno molecular. El contenido de vapor de agua es muy destructivo para las longitudes de onda mayores, pero es función de la altura a la que se encuentre el observatorio, por eso la mayoría de los observatorios infrarrojos se encuentran en sitios muy altos y secos. Tal es el caso de los telescopios Keck (10m) situados en el volcán Mauna Kea en Hawái.

#### Espaciales

En el espacio la máxima longitud de onda observable está acotada a 3km (100Hz) debido a que el medio interestelar absorbe toda la radiación por debajo de la llamada frecuencia de plasma. En el extremo de las altas energías los rayos gamma correspondientes a energías de  $510^4$ eV chocan con fotones produciendo pares electrón – positrón, impidiendo su observación. Además el hidrógeno interestelar se absorbe y se ioniza con la radiación ultravioleta y los rayos x de bajas energías (13.6eV) impidiendo su detección.

## 1.2 El Telescopio

El principal instrumento para la exploración del cosmos es el telescopio. Su origen se remonta al siglo XVII. En sus inicios se construyeron únicamente para el visible, en la actualidad existen telescopios para prácticamente todas las bandas del espectro electromagnético.

## 1.2.1 Tipos de Telescopios

Los telescopios se clasifican de acuerdo a su intervalo de observación, es así que en la actualidad existen telescopios: ópticos, infrarrojos, de rayos x, radiotelescopios, etc. Debido a que nuestro intervalo de visión esta precisamente en el llamado óptico, es en la banda en la que mayor investigación se ha realizado. Hoy día gracias a los detectores, se tiene la posibilidad de investigar otras longitudes de onda y de coleccionar mayor número de fotones a través de exposiciones de mayor tiempo. El primer detector que se tuvo para observaciones más eficientes fue la placa fotográfica, con el correr de los años surgieron los detectores de vacío el desarrollo de los semiconductores ha beneficiado a la astronomía con los modernos detectores de estado sólido. La *Figura 1.2* muestra la evolución de los detectores y el estado de arte actual.

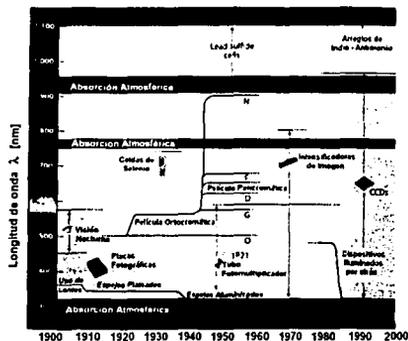


Figura 1.2 Evolución de los detectores.

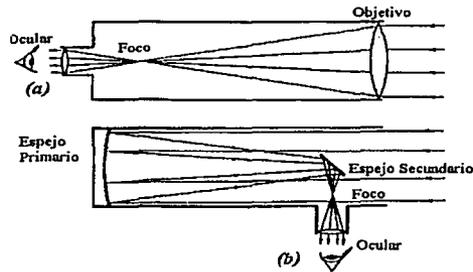
En seguida se resumen las características de los diferentes tipos de telescopios:

### 1.2.1.1 Telescopios Ópticos

Existen dos filosofías básicas de diseño dependiendo de la propiedad de la radiación electromagnética que intervenga: reflexión o refracción.

#### Telescopios Refractores

Los telescopios refractores están formados por un par de lentes, una llamada objetivo porque es la más cercana al objeto, y la otra llamada ocular porque es la más cercana al ojo *Figura 1.3*. El objetivo es una lente convergente, que forma una imagen del objeto, la cual será mayor en tanto más larga sea su distancia focal, por esta razón representan un inconveniente ya que distancias focales muy grandes implican un telescopio demasiado largo susceptible a flexiones que ocasionan inestabilidad y distorsionan la imagen. Aunado a esto, el soporte de las lentes es únicamente lateral y pasivo por lo que el tamaño de la lente objetiva es limitado. El último de los grandes refractores fue el 1.0m de Yerkes cuya longitud era 19 veces su diámetro.

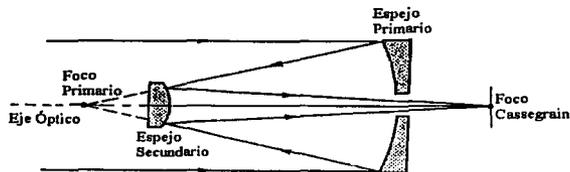


*Figura 1.3 Telescopios Ópticos: (a) Refractor; (b) Reflector; Configuración Newtoniana.*

### Telescopios Reflectores

El telescopio reflector (Figura 1.3 y Figura 1.4) se trata de un espejo cubierto con una delgada capa de aluminio. La forma del espejo es parabólica o hiperbólica. Una parábola refleja los rayos de luz a un solo punto llamado foco, en este punto se coloca un ocular para observar, o bien un instrumento detector de fotones, a esta configuración se le llama de *primer foco*. La ventaja principal de este tipo de telescopio consiste reflejar la luz mediante un espejo secundario a través de un agujero en la superficie del primario. La distancia focal efectiva queda determinada por la posición y forma del espejo secundario. Así, se pueden tener distancias focales grandes con telescopios de corta longitud lo que los vuelve más estables. La razón focal  $f/\# = f/D$  determina la longitud del telescopio. Otra ventaja es que los espejos al contrario de las lentes, pueden ser soportados por la parte posterior y además lateralmente.

Los telescopios actuales son reflectores por sus ventajas sobre los refractores. Las configuraciones primario-secundario más utilizadas son la *Cassegrain* y la *Ritchey-Chretien*. En la Cassegrain el espejo primario es parabólico y el secundario hiperbólico mientras que en la Ritchey-Chretien el primario es hiperboloide y el secundario también lo es.



*Figura 1.4 Telescopio Reflector. Configuración Cassegrain*

### 1.2.1.2 Radiotelescopios

Son antenas reflectoras parabólicas que funcionan igual que un telescopio óptico. Su poder de resolución esta dado por  $\lambda / D$ , por lo que se requieren antenas de varios kilómetros para alcanzar la misma resolución que un telescopio óptico. Con ayuda de la interferometría se forman cadenas de radiotelescopios para obtener una apertura y resolución mayores tal es el caso de VLA formado por 27 antenas de 25m cada una.

### 1.2.1.3 Telescopios espaciales

Estos telescopios se localizan fuera de la atmósfera orbitando alrededor de la tierra, lo que brinda varias ventajas: por un lado la resolución no esta limitada por la turbulencia así que estaría en el límite impuesto por la difracción, además el intervalo espectral de observación es mayor pues se evita la absorción atmosférica, pueden entonces observarse en el UV e infrarrojo. Por último, la ausencia de gravedad permite que las componentes mecánicas y ópticas sean más ligeras y no tiene problemas de flexiones y deformaciones. No obstante, el tamaño del telescopio esta limitado por transporte y puesta en órbita del mismo, el control térmico es mas difícil que sobre la tierra debido al entorno extremoso en el que se encuentra. Como ejemplo cabe mencionar al telescopio espacial Hubble de 5m de diámetro.

### 1.2.1.4 Telescopios infrarrojos

La astronomía infrarroja presenta dificultades que no se presentan en el óptico. Una de ellas es la absorción por la atmósfera (sección 1.1.2). La otra es la radiación de fondo infrarroja o *background*, debida a la temperatura propia de los objetos terrestres, tales como: el aire, el edificio y el telescopio mismo, entre otros. Para observaciones en el infrarrojo, la radiación colectada es la suma de la radiación del objeto y la radiación de fondo. Ambas la fuente y el fondo deben ser medidas por separado, el cálculo de la diferencia entre ellas da la radiación del objeto. Las mediciones del fondo son hechas usualmente con un secundario que oscila entre la fuente y el fondo a una razón de 10 a 60 Hz, de este modo el fondo puede ser eliminado

Figura 1.5.

Para registrar la radiación se utilizan detectores semiconductores. El detector debe ser enfriado para reducir su propia radiación térmica. De hecho tanto el telescopio y el edificio son ventilados durante el día para lograr una isotermalización eficiente y rápida entre el telescopio y el ambiente al comenzar la observación. Este tipo de observaciones tienen que llevarse acabo en lugares altos y secos, pues la mayor parte del vapor de agua permanece en las capas inferiores de la atmósfera. A este respecto, el Observatorio Astronómico Nacional ubicado en la sierra de San Pedro Mártir es uno de los mejores sitios del hemisferio norte.

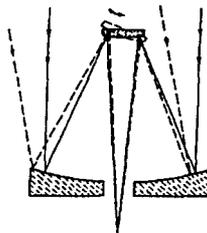


Figura 1.5 Secundario oscilante

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los telescopios ópticos-infrarrojos proveen una amplia cobertura del espejo electromagnético (0.3 a 35  $\mu\text{m}$ ), permitiendo una gran versatilidad en los problemas que se pueden abordar: investigaciones en regiones de formación estelar, estrellas variables y nubes moleculares, entre otras. Cuyo objetivo principal es obtener un conocimiento más profundo sobre el origen y destino del Universo.

### 1.2.1.5 Arreglos de Telescopios

Con la finalidad de obtener resoluciones mayores pero sin enfrentar los problemas mecánicos que generaría incrementar el diámetro, se ha optado por construir arreglos de telescopios, tal es el caso de el Telescopio Binocular LBT<sup>1</sup> que consiste en dos espejos de 8.4m en una montura común con los que es posible obtener por interferometría una capacidad colectora equivalente a la de un espejo sencillo de 11.8m y un poder de resolución correspondiente a un espejo de 22.1m. El telescopio VLT<sup>2</sup> de la ESO<sup>3</sup> formado por cuatro espejos de 8m con una capacidad colectora equivalente a un espejo de 16m.

## 1.2.2 Calidad de la imagen

La calidad de la imagen en un telescopio esta limitada por diversos factores, unos asociados al telescopio mismo, otros al medio en el que se propaga la luz y otros a la naturaleza de la luz.

### 1.2.2.1 Difracción

El efecto llamado difracción se produce cuando una onda, ya sea de luz, de radio o acusto-mecánica como el sonido, pasa por una abertura. El efecto es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurren donde quiera que una porción de un frente de onda es obstruido de alguna manera. Al limitar la extensión lateral del la onda con la abertura el haz luminoso u onda cambia su dirección de propagación cerca de los bordes, abriendo el haz un poco en forma de abanico. La desviación angular del haz es tanto mayor cuanto menos sea la abertura del diafragma.

Un sistema óptico limita la extensión lateral del haz luminoso; por lo tanto, es inevitable que se produzca el fenómeno de la difracción. La difracción hará que la imagen de una estrella supuestamente puntual sea en realidad un punto central de diámetro  $k\lambda/D$  rodeada de anillos más débiles, como se muestra en la figura de la derecha.



Figura 1.6 Discos de Airy

<sup>1</sup> Large Binocular Telescope

<sup>2</sup> Very Large Telescope

Debido a la difracción, en un telescopio perfecto, sin aberraciones, dos estrellas cercanas pueden aparecer como una misma. Dos objetos pueden observarse separados solamente si la distancia angular  $\theta$  entre ellos es:

$$\theta \geq k \frac{\lambda}{D}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación detectada;  $D$  es el diámetro del telescopio y  $k$  es una constante cuyo valor depende del criterio que se utilice para la medición. Sin embargo, a causa de la atmósfera, para telescopios terrestres este límite es alcanzable solo si se cuenta con un sistema de óptica adaptativa.

### 1.2.2.2 Errores del Telescopio

Debidos a la construcción y funcionamiento del telescopio:

Errores residuales de pulido, las irregularidades ópticas de la superficie reflejante deben ser mínimas en comparación con la longitud de onda que se quiere observar ( $\lambda/20$ ).

Flexiones en la estructura ocasionadas por la gravedad.

Gradientes térmicos. Una diferencia de temperatura, entre el espejo y el medio, de solo 1 K produce turbulencia significativa, degradando la calidad de la imagen [1].

### 1.2.2.3 Errores ocasionados por el medio

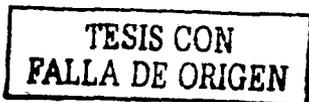
La atmósfera esta en continuo movimiento y agitación lo que provoca que la imagen de una estrella se desenfoque y mueva constantemente. Al entrar a la atmósfera terrestre, el frente de onda plano proveniente de la estrella se distorsiona, debido a las diferencias en el índice de refracción que se encuentra a su paso. A este fenómeno se le conoce como *seeing*. El tamaño del seeing puede variar desde un segundo de arco hasta decenas de segundos de arco dependiendo del sitio. A menos que estos errores sean corregidos por un sistema de óptica adaptativa, es imposible alcanzar el límite de difracción teórico del telescopio.

### 1.2.3 Partes de un Telescopio Óptico

Las partes principales de un telescopio reflector son: montura, espejo primario y espejo secundario, además de la platina de instrumentos.

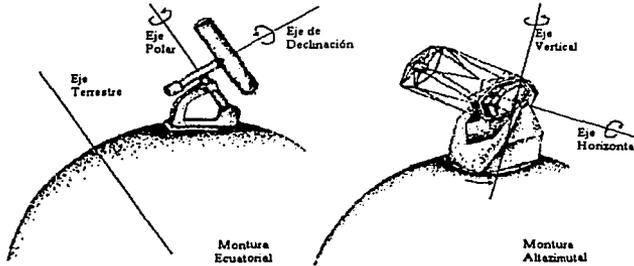
---

<sup>1</sup> ESO: European Southern Observatory



## Monturas

El telescopio debe ser colocado en un soporte estable que prevenga las vibraciones. Existen dos tipos principales de monturas: ecuatorial y azimutal *Figura 1.7*. La *montura azimut* es la más sencilla y estable para telescopios grandes, con dos ejes perpendiculares entre sí. El eje vertical determina el azimut y el horizontal la altura.



*Figura 1.7 Monturas para Telescopios.*

La *montura ecuatorial* también posee dos ejes perpendiculares. El eje polar paralelo al eje de la tierra y el eje de declinación perpendicular a este. Tiene la ventaja de corregir con un solo eje el movimiento de rotación terrestre por lo que es más fácil de controlar el movimiento del telescopio. No obstante, requiere de contrapesos para mantener el telescopio en equilibrio. Para los diámetros que se manejan hoy en día se prefiere la montura altazimutal.

## Espejo Primario

El espejo primario es la parte principal del telescopio. Para la obtención de imágenes de alta calidad óptica se requiere de espejos con alta rigidez que no deformen el frente de onda que llega a su superficie. Desde la invención de telescopio, la necesidad de lentes y espejos de alta precisión y estabilidad ha sido un reto constante para los científicos e ingenieros. La solución clásica para mantener la figura de la superficie en espejos de gran tamaño contra los efectos de la gravedad y los cambios de temperatura ha sido usar materiales rígidos y estables como: vidrio, cuarzo y cerámica. Sin embargo, por su diámetro, la manufactura y el pulido los espejos se han hecho cada vez mas complejos, así como las estructuras requeridas para soportarlos. Los procesos de manufactura para los espejos son largos y costosos y requieren infraestructura especial. En este contexto, se han desarrollado varios tipos de espejos primarios: monolíticos, huecos, menisco, segmentados.

### I. Espejos monolíticos

Son espejos macizos muy rígidos contruidos de materiales con alta estabilidad mecánica y térmica como el ZERODUR<sup>4</sup>. El espesor es de un sexto de su diámetro, con lo que se incrementa enormemente el peso total del telescopio y es difícil de manejar. Los espejos más grandes con esta tecnología son: el Telescopio Hale (5m), en el observatorio de Monte Palomar, California y el Telescopio Zelenchuskaya (6m), Rusia. La flexión de un espejo monolítico debida a su peso se incrementa a una razón del cuadrado del diámetro, para telescopios mayores de 5m el peso y la flexión resultan excesivas, la distorsión mecánica puede ser compensada en alguna medida ajustando los soportes, pero dichos espejos tienen además el problema de la inercia térmica: las diferencias de temperatura entre la superficie del espejo y el ambiente causan turbulencia degradando la calidad de la imagen *Figura 1.8.a*.

### II. Espejos huecos

Los espejos son contruidos con una estructura interna de panel de abeja, que disminuye su peso y aumenta su rigidez *Figura 1.8.d*. El material del que están hechos es borosilicato. La estructura de panel de abeja reduce el peso que tendría un telescopio monolítico del mismo diámetro hasta 5 veces o más. Otra característica importante es que permite la circulación del aire por debajo de la superficie reflectora, a través de los huecos, manteniendo el equilibrio térmico con el medio, de hecho, estos espejos son los que tienen la mejor isotermalización. Los espejos más grandes de este tipo son los de 8.4m para el LBT.

### III. Espejos de menisco

Se trata de discos monolíticos con una razón diámetro/espesor de 40:1 lo que los hace manipulables mecánica y ópticamente *Figura 1.8.c*. Soportados por un gran número de actuadores para aumentar su rigidez y evitar los efectos del golpeteo del viento, lo que incrementa considerablemente su costo. El telescopio Subaru de 8.3m fabricado de ULE<sup>5</sup> utiliza 260 actuadores axiales para controlarlo. Los telescopios Genimi de 8m de diámetro también cuentan con esta tecnología.

### IV. Espejos segmentados

Para hacer factible la construcción de telescopios con una área colectora cada vez mayor es necesario fragmentar o segmentar su óptica primaria *Figura 1.8.b*. Formados por segmentos hexagonales, con un espesor de un décimo del diámetro total, requieren un sistema de control complejo para el cofaseo, la suspensión y el posicionamiento que permita se comporten como una superficie óptica uniforme. Además, la separación entre los segmentos provoca la difracción de las imágenes. Los telescopios Keck 10m y el GTC<sup>6</sup> de 11m fabricados de Zerodur son un ejemplo.

---

<sup>4</sup> ZERODUR © Schott Glasswerke, Mainz, Al..

<sup>5</sup> Corning Ultra-Low Expansion glass

<sup>6</sup> Gran Telescopio Canarias



### V. Espejos segmentados flexibles

Nuevo esquema de espejos flexibles que permitan sustituir los segmentos vitrocerámicos por membranas delgadas de vidrio con 10 o 15 mm de espesor sin aumentar el número de actuadores y serán presentados en los capítulos posteriores.

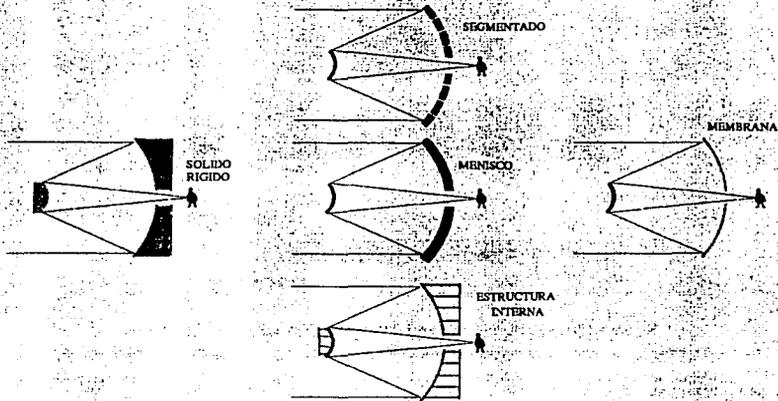


Figura 1.8 Clasificación de espejos primarios de acuerdo a su manufactura.

### Espejo secundario

Como se mencionó, la ventaja principal de los telescopios reflectores es su espejo secundario que permite acortar la longitud total del telescopio haciéndolo más estable. Además, a diferencia del espejo primario, un telescopio puede intercambiar espejos secundarios y con ello modificar su razón focal dependiendo de las necesidades de la investigación que se lleve a cabo.

Los espejos secundarios cuentan con un sistema de alineación que puede ser activo, por ejemplo un hexápodo Figura 1.9 con 6 grados de libertad que alinea al secundario y además corrige las aberraciones de bajo orden. Algunos esquemas de control utilizan un secundario adaptativo que permite corregir las aberraciones atmosféricas.

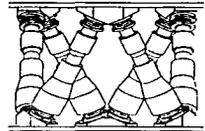


Figura 1.9 Hexápodo

Compensar las aberraciones atmosféricas directamente en el telescopio elimina pérdidas de luminosidad que ocurren al usar más elementos ópticos, sin embargo el inconveniente principal es el calor generado por los actuadores, el cual es dañino para observaciones en el infrarrojo. Algunos esquemas de secundarios adaptativos que han sido utilizados se listan a continuación:

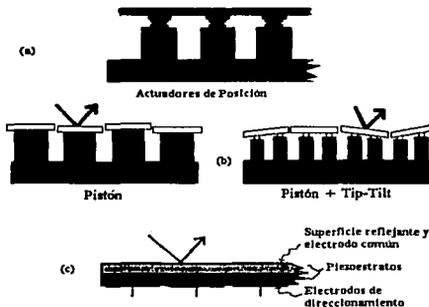


Figura 1.10 Espejos deformables; (a) Deformable, (b) Segmentado, (c) Bimorfo

#### Secundarios Deformables

Formados por una cara delgada y continua de material vítreo soportada por una matriz de actuadores unida a una base estable y masiva generalmente hecha del mismo material (Ultra Low Expansion Cuarz, p.e.) para evitar los efectos de la distorsión térmica. Los actuadores son de cerámica piezoeléctrica que responden a voltajes produciendo deformaciones locales del bloque piezo-resistivo que son impresas a la cara reflectora *Figura 1.10.a*.

#### Secundarios dimorfos

Los espejos bimorfos también emplean superficies delgadas y continuas, pero estas son soportadas y manipuladas totalmente diferente a los espejos deformables. Los actuadores son discos planos de material piezoeléctrico que son unidos a la parte posterior del espejo. Los voltajes aplicados causan el cambio en las dimensiones de los actuadores paralelos a la cara anterior provocando fuerzas de tensión y deformando la cara reflectante *Figura 1.10.c*.

#### Secundarios segmentados

Semejantes a los primarios segmentados explicados anteriormente. Consisten en una matriz de elementos triangulares, cuadrangulares o hexagonales cada uno soportados sobre una estructura de actuadores con tres grados de libertad que corrigen aberraciones de orden inferior *Figura 1.10.b*. El inconveniente principal es, al igual que en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

el caso de los espejos primarios, que tienen que ser calibrados para que se comporten como una superficie uniforme. Además las separaciones entre los segmentos, a pesar de pequeñas, inevitablemente difractan la luz, afectando a la imagen obtenida.

## 1.2.4 Telescopios de nueva tecnología

Hasta hace poco los telescopios astronómicos eran instrumentos pasivos sin elementos correctores para mejorar la calidad de las imágenes durante la observación, los ajustes se hacían durante el día o al inicio de la noche. La nueva tecnología en telescopios terrestres busca obtener imágenes de alta calidad con la implementación de técnicas de control que permiten compensar, en tiempo real, las aberraciones producidas por el telescopio y la atmósfera. Estas técnicas de recuperación del frente de onda se clasifican por la frecuencia temporal y espacial de las aberraciones que corrigen en: óptica activa y óptica adaptativa *Figura 1.11*.

### 1.2.4.1 Óptica activa y adaptativa

La *óptica activa* busca corregir las aberraciones de baja frecuencia producidas por cambios en el gradiente térmico, flexiones y deformaciones gravitatorias que desalinean el espejo, errores residuales en el pulido de los espejos, etc. Todo esto provoca aberraciones de bajo orden que degradan la imagen. Los sistemas activos son implementados en el espejo primario. En 1989 el telescopio NTT (New Technology Telescope) de 3.5m implementó por vez primera un sistema de óptica activa formado por 78 actuadores que soportan al espejo primario y le permiten deformar el frente de onda para compensar los errores propios del telescopio.

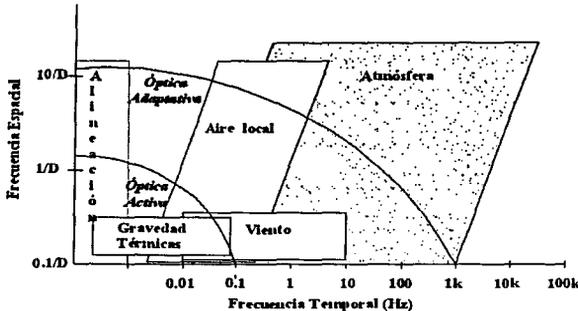
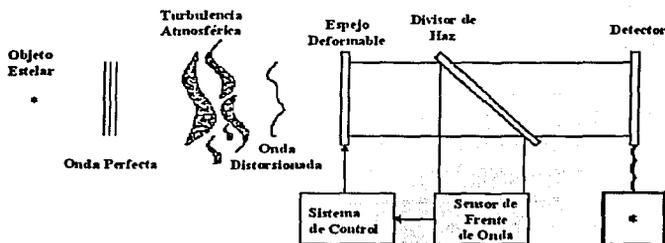


Figura 1.11 Óptica Activa y Adaptativa. Anchos de Banda.

La **óptica adaptativa** se encarga de corregir las aberraciones producidas por perturbaciones de alta frecuencia, tales como el seeing atmosférico y el golpeo del viento. Cuando esto se logra la calidad de la imagen queda limitada únicamente por el diámetro del telescopio. Los sistemas adaptativos son implementados en elementos menos masivos, generalmente en el espejo secundario o en un terciario para lograr los cambios rápidos que se requieren. La obtención de imágenes limitadas únicamente por difracción desde un telescopio terrestre es posible gracias a los sistemas de óptica adaptativa. En la *Figura 1.11* se observa los anchos de banda de las diferentes perturbaciones y el tipo de control, ya sea activo o adaptativo, con el que se compensan. La frecuencia espacial esta en fracciones del diámetro  $D$  del telescopio.

Un sistema de corrección de aberraciones ya sea activo o adaptativo consiste básicamente en un *elemento activo* (espejo deformable) opuesto a las fluctuaciones de la perturbación (atmosféricas o del telescopio), un *sensor de frente de onda* que mide la forma que se le debe dar al elemento activo con base a una referencia y un *algoritmo de control* que calcula las deformaciones del elemento activo con respecto a las señales del sensor *Figura 1.12*.



*Figura 1.12 Funcionamiento básico de un sistema de Óptica Activa/Adaptativa*

El objetivo del control activo es la corrección de las aberraciones del frente de onda mediante la deformación negativa de las superficies ópticas, clásicamente estas deformaciones en el frente de onda se analizan mediante la expansión en polinomios ortonormales de Zernike que describen el desfaseamiento del frente de onda respecto a un frente de onda plano ideal en cada punto del espejo [2]. La expansión en polinomios de Zernike es una herramienta matemática utilizada para modelar la distorsión del frente de onda debida a la atmósfera o al propio telescopio. En la *Figura 1.13* es una representación gráfica de los primeros ocho ordenes de Zernicke obtenida con el programa Mathematica 2.2.

### 1.2.5 Telescopios del futuro

Actualmente debido al costo y a las dificultades construir y manipular grandes superficies ópticas, se ha optado por segmentarlas, tal es el caso de los telescopios Keck y el GTC. Los telescopios del futuro tendrán que ser segmentados y realizar correcciones adaptativas desde su óptica primaria. Los proyectos actuales más ambiciosos son el Telescopio CELT<sup>7</sup> de la universidad de California con un diámetro propuesto de 30m, el Telescopio XLT y el OWL<sup>8</sup> de la ESO<sup>9</sup> de 100m de diámetro.

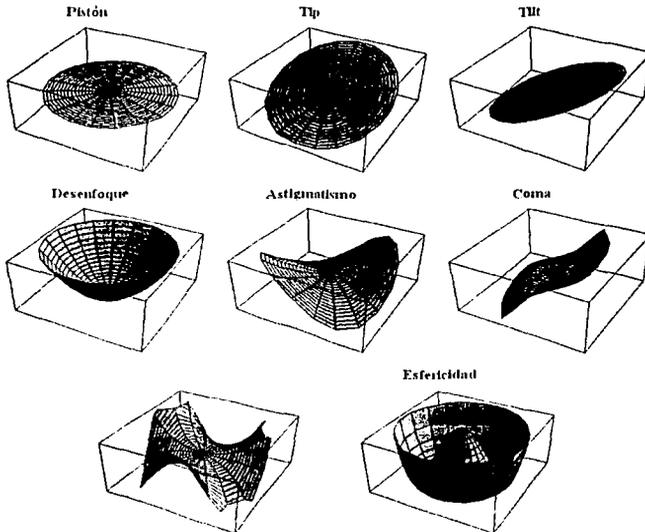


Figura 1.13 Polinomios de Zernike

<sup>7</sup> California Extremely Large Telescope

<sup>8</sup> Overheimgly Large Telescope

<sup>9</sup> European South Observatory

*Bibliografía y referencias*

- [1] Chen, P. "Telescopes: Coming of Age in the 20<sup>th</sup> Century" Sky&Telescopes. Agosto 2000.
- [2] Hardy, J. "Adaptive optics for astronomical telescopes" Oxford University Press. New York , 1998.( Oxford series in optical and imaging sciences: 16).
- [3] Hetch, E. et. al. "Óptica" Primera edición. Adison-Wesley Iberoamericana. Estados Unidos 1986
- [4] Karttunen, H. et. al. "Fundamental Astronomy" Segunda edición. Springer Verlag. Berlin, 1994.
- [5] Malacara D. et. al. "Telescopios y Estrellas" Cuarta reimpresión. Fondo de Cultura Económica. México 1995 (Colección: La Ciencia desde México #57 )
- [6] Tyson, R. "Introduction to Adaptive Optics" Primera edición. SPIE PRESS. E.U.A 2000 (Serie: Tutorial Text in Optical Engineering Vol. TT41)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **2 Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano TIM**

El interés de nuestro país por la astronomía data de tiempos prehispánicos. Las civilizaciones que se asentaron en el territorio mexicano construyeron edificios en los que registraban el paso del tiempo. Actualmente, en el Observatorio Astronómico Nacional OAN se continúa con el estudio del Cosmos. El OAN a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuenta con cuatro telescopios de 80cm, 1.5m y 2.12m de diámetro cada uno, localizados en San Pedro Mártir, B.C. y un telescopio de 1.1m en Tonantzintla, Pue..

En la construcción y diseño del telescopio de 2.12m, así como en la modernización y mantenimiento del observatorio han participado investigadores de la UNAM. Gracias a su labor, el OAN sigue siendo un sitio apropiado para realizar investigaciones de nivel. Sin embargo, hoy en día los telescopios poseen capacidades colectoras de 10m, y en un futuro no muy lejano serán de 30m y 100m, ahondar en el conocimiento del Universo requiere de la infraestructura necesaria, por esta razón en la UNAM se diseña y construye un telescopio de nueva tecnología: el Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano TIM. En este capítulo se describe brevemente el proyecto TIM.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Existen dos alternativas de diseño para los segmentos. La propuesta convencional es fabricarlos de un material de baja expansión térmica como el Zerodur, con un espesor de 75mm y 430 kg de peso, y aprovechar la estabilidad del material para que los segmentos sean su propia referencia. La otra propuesta son los *espejos flexibles* que serán presentados en el siguiente capítulo.

### Calidad de la imagen del espejo primario

El espejo primario se encuentra sujeto a diversos tipos de perturbaciones que pueden devaluar la calidad de su imagen. Uno de los principales problemas de un espejo segmentado es mantener alineados todos sus segmentos, garantizando un comportamiento óptico uniforme. Como cada uno de los segmentos se encuentra bajo la acción de su propio peso, puede desalinearse del resto, afectando la forma global del espejo primario. Por todo esto, un espejo segmentado requiere del control activo para que se comporte como una superficie uniforme. El control activo corrige los errores de bajo orden espacial [1.2.4], estos se refieren al posicionamiento y se clasifican como: errores de tip-tilt, errores de pistón y errores laterales *Figura 2.3.*

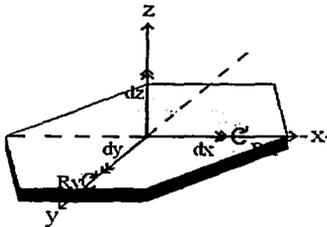


Figura 2.3 Grados de libertad del segmento.

Los errores laterales, desplazamiento en  $x$  ( $dx$ ) y desplazamiento  $y$  ( $dy$ ), desalinean el espejo primario del secundario. Son ocasionados por las deformaciones térmicas de la celda y la acción de la gravedad, esta última es crítica cuando el telescopio mira al horizonte.

La tolerancia en la corrección de los errores es función de la longitud de onda que se observe. *Tabla 1*

Tabla 1 Tolerancia máxima para obtener imágenes limitadas por seeing.

Longitud de onda	Pistón	Tip-tilt
1.25 $\mu\text{m}$	90nm	72nm
500nm	40nm	30nm

La sensibilidad de los sensores, así como la precisión de los actuadores utilizados queda determinada por estos datos.

Además se presentan errores de mayor frecuencia espacial, ocasionados por la huella de los actuadores en la superficie (ya que el segmento no es rígido) y por errores residuales de pulido de cada segmento. Estos errores tales como coma, astigmatismo y esféricidad *Figura 1.15*, quedan a cargo del sistema de suspensión neumática del telescopio.

### 2.1.1.2 Celda Activa (Óptica y Control Activos)

Mantener la superficie uniforme requiere de la alineación y posicionamiento correcto de los segmentos, en la *Tabla 1* se observa que esta precisión requerida es del orden de nanómetros para lograrlo es necesario un sistema de óptica activa. Cada segmento individual es controlado activamente para asegurar su posición correcta.

El conjunto de actuadores y sensores para mantener una superficie óptica uniforme, se encuentra localizados en la celda activa *Figura 2.4*. Cada segmento cuenta con sensores de proximidad y temperatura colocados en su cara posterior (*Figura 2.11*). El control activo es de dos niveles: axial y lateral.

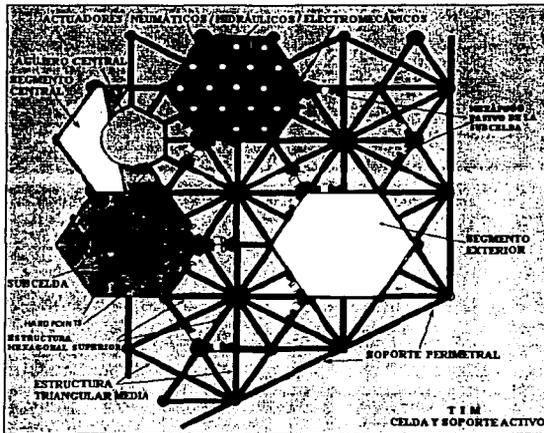


Figura 2.4 Celda Activa.

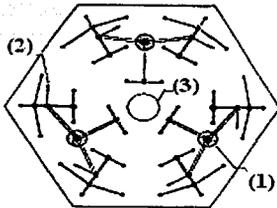


Figura 2.5 Actuadores del Keck..

En general los sistemas de soporte del primario implementados en otros telescopios de nueva tecnología utilizan actuadores electromecánicos puntuales, en particular, los telescopios segmentados como el Keck o GTC (Figura 2.5), soportan el peso del segmento sobre 3 puntos de apoyo o posicionadores (1) localizados sobre una circunferencia de radio 0.47m de diámetro, cada punto de apoyo distribuye su acción en 12 actuadores (2), teniéndose un total de 36 apoyos por segmento. El soporte lateral es totalmente pasivo y consiste en un mástil fijo al centro del segmento y unido rigidamente a la celda de acero (3). [5]

El TIM por su parte propone dos sistemas de soporte axial activos dependiendo del ancho de banda espacial de las perturbaciones a corregir y un soporte lateral también activo. El soporte axial de cada segmento se distribuye en dos tipos de actuadores: 3 definidores axiales de posición y 19 actuadores de fuerza neumáticos.

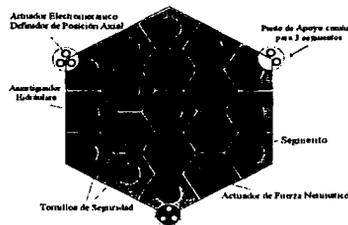


Figura 2.6 Segmento y actuadores del TIM.

### I. Sistema de suspensión

Consiste 19 actuadores neumáticos que cubren en su totalidad la parte posterior del segmento, reparten uniformemente su peso y distribuyen las fuerzas homogéneamente en contraste con los apoyos puntuales Figura 2.7. Además, es posible la corrección de aberraciones de alto orden espacial (coma, astigmatismo y esfericidad), con esto se disminuyen las exigencias del pulido y por lo tanto el costo por segmento.

Cada una de estas bolsas neumáticas esta asociada con un actuador hidráulico Figura 2.6 a la misma presión cuya función es amortiguar los efectos del golpeo del viento aumentando la rigidez del segmento. El sistema de

suspensión activa tiene como antecedente la implementación exitosa de un sistema de actuadores neumáticos activo para el telescopio de 2.1m del OAN [11].

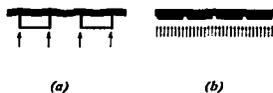


Figura 2.7 Distribución de los esfuerzos:(a)Keck; (b)TIM

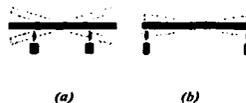


Figura 2.8 Definidores axiales: (a)Keck; (b) TIM.

## II. Sistema de posicionamiento

El objetivo de este sistema es que la superficie total del espejo segmentado se comporte ópticamente como un monolítico. La alineación tridimensional de cada segmento con respecto a la superficie parabólica del primario se auxilia de tres actuadores electromecánicos que corrigen los errores de pistón y tip/tilt, utiliza un sistema de sensores capacitivos tridimensionales de posición diferencial cercanos a cada vértice del hexágono con una precisión de 10nm [7] cuyo marco de referencia es el mismo Zerodur que es un material muy estable a los cambios de temperatura. Un sistema de control lee los errores de posicionamiento en los sensores capacitivos y mediante un algoritmo calcula los desplazamientos de los actuadores para corregirlos. Para un cofaseo más fino se utiliza un lazo óptico con un sensor de frente de onda. Actualmente se estudia un sistema de control difuso para el posicionamiento activo del TIM [4].

En la *Figura 2.8* se observa que los actuadores del TIM han sido situados en las esquinas de cada segmento hexagonal a diferencia de otros esquemas, esta distribución disminuye los errores de tip/tilt y pistón entre segmentos ya que los actuadores aleñaños comparten el mismo punto de apoyo (hard point). Cada actuador soporta 1/600 del peso del segmento gracias a los actuadores neumáticos que distribuyen el peso total.

## III. Sistema de alineación

Uno de los problemas principales de los telescopios es el soporte lateral, este se vuelve crítico cuando el telescopio mira hacia el horizonte, para evitar que los segmentos se pierdan alineación es necesario implementar un sistema de soporte activo. El soporte activo propuesto consiste en un conjunto de 6 actuadores electromecánicos de baja resolución, que se encargan de definir la posición radial de cada segmento. Este diseño no genera interferencia con el movimiento axial del segmento. En la *Figura 2.9* se muestra una propuesta preliminar de los posicionadores laterales formado por elementos flexores [1]. Utiliza como referencia al Zerodur en lugar de la celda que esta sujeta

a deformaciones térmicas. En cambio, el soporte lateral del telescopio Keck es pasivo y consiste en un mástil incrustado en el centro del segmento y unido rígidamente a la celda *Figura 2.10*



*Figura 2.9 Posicionadores laterales del TIM.*



*Figura 2.10 Soporte lateral pasivo del Keck.*

### 2.1.1.3 Espejo Secundario

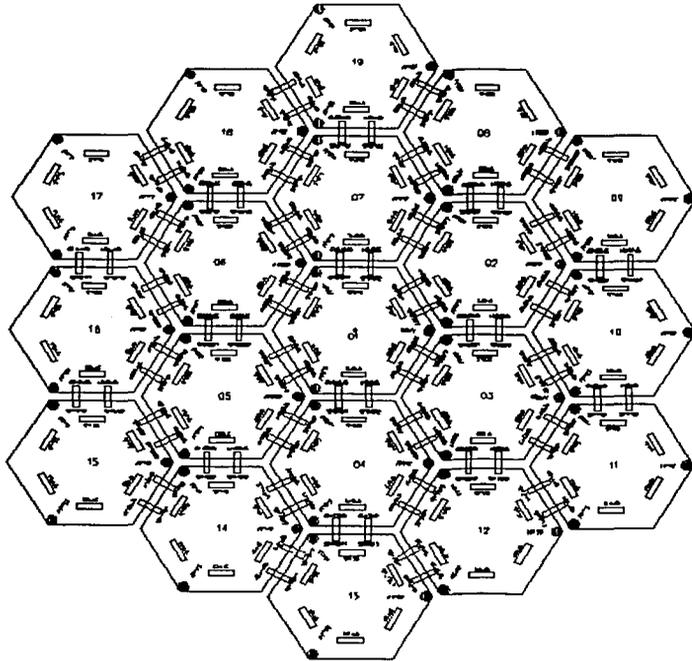
El espejo secundario tendrá un diámetro de 935.34mm con una razón focal de  $f/15$ , se proyecta deformable para compensar las aberraciones atmosféricas y obtener imágenes limitadas por difracción. La propuesta de membranas híbridas activas [Cap. 3] también constituye una alternativa para el diseño de un secundario adaptativo .

### 2.1.2 Sistema de control distribuido

Existen dos procesos de control activo: de malla abierta y de malla cerrada. El *proceso de malla abierta* funcionará en tiempo real para corregir aquellas perturbaciones predecibles ocasionadas por inestabilidades gravitacionales y térmicas del telescopio. Este control abierto será alimentado por un modelo numérico del telescopio que predice como está cambiando el telescopio de acuerdo a su posición y a las condiciones del medio (principalmente temperatura). Las perturbaciones no predecibles por este modelo (p.e. el viento) y los errores residuales del mismo serán controladas mediante el *proceso de malla cerrada* retro-alimentada con un sensor de frente de onda.

Los sistemas de control son los responsables del desarrollo global del telescopio. La calidad de la imagen depende del control preciso de cada uno de los elementos del TIM. El control de la superficie del primario (celda activa), representa un reto tecnológico por la cantidad de variables, la precisión necesaria y el manejo de señales de baja S/N.

En la *Figura 2.11* se observa esquemáticamente los 19 segmentos de la celda con sus respectivos sensores y actuadores. Cada segmento posee tres definidores axiales, seis sensores térmicos, y sensores de proximidad comunes a los segmentos adyacentes. En su conjunto son 1106 señales.



*Figura 2.11 Celda activa. Conjunto de sensores y actuadores.*

Para integrar las señales de los sensores (temperatura y capacitivos) y las señales de control de los actuadores (neumáticos, hidráulicos y electromecánicos) de los 19 segmentos, se propone un sistema dedicado para cada segmento, integrado en un sistema de control distribuido para la celda en su conjunto. La comunicación de cada segmento con el control de la celda en general se plantea a través de una plataforma Ethernet rápida con protocolo TCP/IP [5].

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 2.1.3 Mecánica

El diseño básico de la montura contempla una estructura tubular, altazimutal (sección 1.2.3.1), rígida y compacta. Tiene dos ejes ortogonales de movimiento, altura y acimut. Cada eje del telescopio es impulsado por un par de motores acoplados por rodillos de fricción que evitan el uso de las cajas de engranajes, eliminando el error periódico que generan.

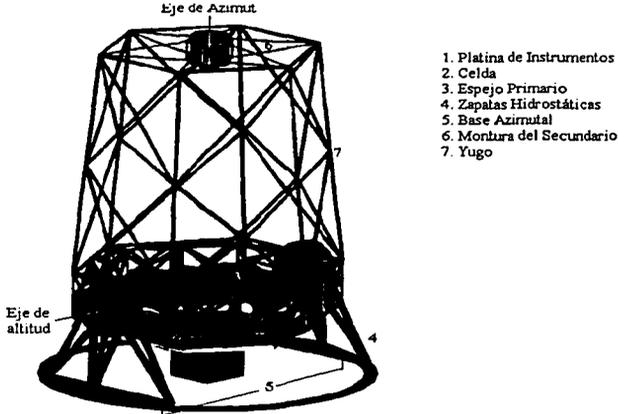


Figura 2.12 Montura del TIM.

El eje de elevación del telescopio será sostenido a cada lado por trípodes que llevan el peso de la estructura directamente a la pista azimutal, descansando sobre ella mediante zapatas hidrostáticas que eliminan completamente la fricción estática y dinámica [9].

La estructura de la celda que alberga y soporta a los segmentos, subceldas, actuadores, sensores y hexápodos, tendrá una construcción en acero tubular. Esta estructura está sometida a esfuerzos que generan deformaciones en la figura óptica del primario. El diseño debe ser lo más rígido posible para minimizar los desplazamientos que afectan la figura del primario. El diseño propuesto garantiza desplazamientos máximos de 160nm [4].

Existe una subcelda (Figura 2.4 y Figura 2.13) de acero estructural independiente para cada segmento, es una plataforma hexagonal que sirve de soporte a cada uno de los 19 segmentos. Contiene a todos los actuadores y sensores

que definen la posición exacta de cada uno. Cuenta con topes mecánicos para la protección en caso de falla y además facilita el mantenimiento de los segmentos. Se encuentra unida a la celda por hexápodos pasivos.

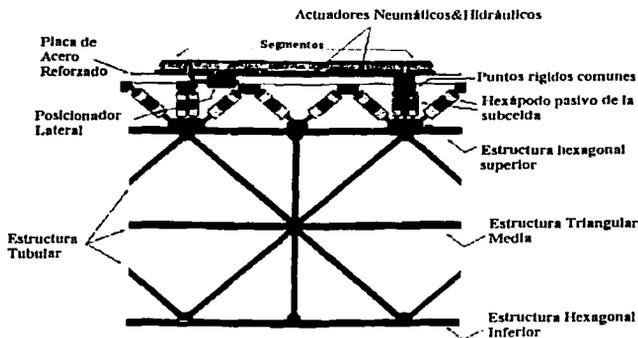


Figura 2.13 Corte lateral de la celda activa.

En el diseño de la montura se utilizan técnicas de elemento finito para simular cada una de sus partes y garantizar su rigidez.

## 2.1.4 Observatorio

El TIM será situado en la sierra de San Pedro Mártir, B.C. uno de los mejores sitios en el hemisferio norte con un seeing menor a 0.5 segundos de arco [2]. El diseño del edificio que albergará al telescopio cumple con requerimientos especiales: en primer lugar, el edificio es aerodinámico para evitar efectos de turbulencia al choque del viento; el telescopio debe estar a una altura de por lo menos 15m por arriba del nivel del suelo para evadir la turbulencia ocasionada por el viento con los árboles de los alrededores; los cimientos de la estructura y el edificio son independientes eliminando así la transferencia de vibraciones; además es necesario que el piso inferior al telescopio se encuentre vacío y expuesto al medio para obtener una termalización adecuada. El diseño del edificio fue desarrollado en la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

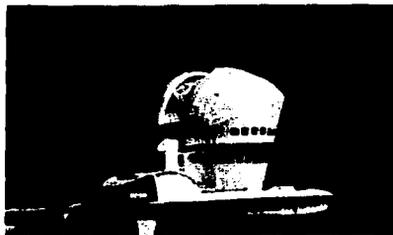


Figura 2.14 Proyecto arquitectónico TIM.

El proyecto TIM busca soluciones no convencionales tanto en los materiales, geometrías y esquemas de control que optimicen su funcionamiento mejorando la calidad de imagen y disminuyendo el peso y por consiguiente el costo total del telescopio. En el siguiente capítulo se presenta una nueva propuesta de espejo flexible que disminuye el peso del espejo primario sin incrementar el número de actuadores necesarios para soportarlo, por su baja masa representa una alternativa real para aplicaciones adaptativas.

**Bibliografía y referencias:**

- [1] Álvarez, P. et. al. "*GRAN TELESCOPIO CANARIAS Conceptual Dsgn*" GRANTECAN, S.A. 1997
- [2] Cruz-González, Irene et. al. "*Óptica y Control Activos*". Instituto de Astronomía, UNAM Observatorio Astronómico Nacional. México 2000.
- [3] Cruz-González, Irene et. al. "*Proyecto del Telescopio Óptico-Infrarrojo de Nueva Tecnología TIM*" Instituto de Astronomía UNAM. México 1998.
- [4] Farha, A. et. al. "*Structure Analysis of the Primary Mirror Support for de TIM, using Computer-Aided Finite Element Method*" Proceedings of SPIE vVol. 4004. p. 568. April 2000.
- [5] Flores, R.et. al "*Proyecto del sistema de control para la celda activa del Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano (TIM)*" Comunicación interna. IAUNAM, agosto 2000.
- [6] Gabor, G. "*Actuators for a Segmented Mirror Control System*" Proceedings of SPIE Vol. 444. p. 287. Septiembre 1983.
- [7] López, G. "*Diseño del sistema de control difuso para el sistema de optica activa (bajos ordenes) del telescopio optico infrarrojo mexicano TIM*" Facultad de Ingeniería UNAM, México 2003.
- [8] Quiros, F., et. al., "*Desing of a Capacitive Sensor for 3D Relative Displacement Measorements to Aling the M1 Segments of the Mexican Infrarred Telescope TIM*", Proc. of SPIE Vol. 4004, pp. 533-539, April 2000.
- [9] Ruiz, E., et. al. "*Hidrostatic Shoe Bearing System for de TIM*", Proc. of SPIE Vol. 4004, pp. 526-530. April 2000

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- [10] Ruiz, E. , et. al. "*Mirror cell and active support system of the Mexican infrared optical telescope (TIM)*", Proc. of SPIE Vol. 3352, pp.544- 550. Marzo 1998.
- [11] Salas, L. et. al. "*Active primary mirror support for the 2.1-m telescope at the San Pedro Mártir Observatory*" Applied Optics Vol. 36, No. 16. June 1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3 Espejos Flexibles

Dos parámetros son particularmente importantes en el diseño de telescopios: la capacidad colectora para el estudio de objetos débiles o lejanos y la resolución angular que determina la nitidez de la imagen, ambas son función del tamaño del espejo primario. El espejo primario es también el elemento más costoso del telescopio. Además de esto un espejo masivo encarece el costo final del telescopio. Hoy en día existen diferentes alternativas para la manufactura y el soporte de los espejos. En el primer caso existen espejos segmentados, huecos o de membrana. En cuanto al soporte este puede ser puntual o distribuido.

La rigidez del espejo, el grado de corrección que se desee y el número de actuadores necesarios para soportarlo están íntimamente relacionados. Ha ocurrido que adelgazar los espejos disminuye la rigidez y por lo tanto es necesario aumentar la cantidad de actuadores para compensar esta pérdida. Los espejos de membrana son especialmente susceptibles al golpeo del viento por lo que su uso se ha limitado a aplicaciones espaciales. En este capítulo se presenta el diseño de un espejo híbrido flexible con características de bajo peso, autoamortiguamiento y que no requiere de un mayor número de actuadores para soportarlo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.1 Interacción de los actuadores con el espejo

La óptica activa se basa en las deformaciones ejercidas sobre el espejo por los actuadores. Los espejos en general, dependiendo de su manufactura pueden ser manipulados para compensar las aberraciones del frente de onda. La naturaleza y la cantidad de corrección, así como el costo y la complejidad del control dependen del tipo de espejo que se trate. Entre más grados de libertad se tengan, mayor será la corrección alcanzada, en otras palabras, el grado de Zernike corregido *Figura 1.13*

Independientemente del tipo de fuerza que interactúe entre el actuador y el espejo, la superficie se deforma por la acción del actuador. Esta deformación se manifiesta como una protuberancia. La forma espacial que presente la protuberancia, es decir su *influencia*, dependerá de los parámetros mecánicos del segmento tales como: módulo de elasticidad<sup>10</sup>, módulo de corte, razón de Poisson<sup>11</sup>, coeficiente de expansión térmica (CET), densidad de masa y espesor del material; así como de la forma del actuador, de la localización y distribución de la fuerza aplicada y de las inhomogeneidades del material. Todos estos parámetros contribuyen a darle una forma única a cada función de influencia *Figura 3.1*.

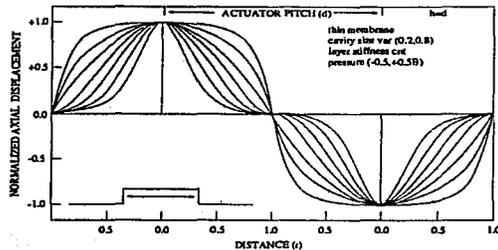


*Figura 3.1 Influencia de un actuador sobre la superficie.*

La acción de un actuador afecta también a la región de influencia de los actuadores del rededor provocando que exista un *acoplamiento* entre ellos *Gráfica 3.1*, este depende del actuador, de la distancia entre los actuadores, y de las características mecánicas del segmento. La acción conjunta de todos los actuadores determina la deformación final de la superficie.

<sup>10</sup> Cuando se aplica un esfuerzo a un sólido, este es de tracción (tensión o compresión) si la fuerza es normal al plano en que actúa, o cortante, si la fuerza se ejerce paralela al plano de acción. La deformación padecida por el sólido es proporcional al esfuerzo aplicado y la constante de proporcionalidad se conoce como módulo de elasticidad para esfuerzos de tracción y módulo de corte para esfuerzos cortantes.

<sup>11</sup> Razón de Poisson: Experimentalmente se comprueba que además de la deformación del cuerpo en la dirección del esfuerzo aplicado ocurre una deformación perpendicular a este. La razón de Poisson es la relación del valor de la deformación lineal en la dirección lateral a la deformación lineal en la dirección axial.



*Gráfica 3.1 Acoplamiento de las influencias de dos actuadores. La gráfica muestra las funciones de influencia de dos actuadores continuos al variar su diámetro.*

Cada actuador ejerce presión independiente del resto de los actuadores, la suma lineal de las funciones de influencia  $Z_i(x,y)$  de cada actuador representa la superficie del espejo  $S(x,y)$ . Si todos los actuadores ejercen la misma presión, en el caso de una superficie rígida el resultado sería un efecto de pistón, sin embargo, para el caso de un menisco o membrana se forma una superficie ondulada con protuberancias de igual amplitud. Este efecto se denomina *rizo* o error RMS, y no debe ser mayor que  $\lambda/20$ .

Las funciones de influencia pueden ser modeladas con ecuaciones simples [6]. En la realidad las funciones de influencia no son perfectamente simétricas ni siquiera iguales para cada actuador. Aquellas que están en la orilla experimentan diferentes esfuerzos que las que se encuentran en el centro. Para propósitos de estudio se prefiere analizarlas con técnicas de elemento finito. El método del elemento finito es una técnica matemática que permite encontrar soluciones numéricas, estas soluciones representan la respuesta de un sistema físico ante excitaciones externas.

A continuación se presentan la nueva propuesta de espejos de membrana y se resume el análisis de su desempeño evaluado con técnicas de elemento finito, posteriormente se comparan los resultados con otras tecnologías de soporte para segmentos. Los análisis son realizados en la plataforma ALGOR. Este software es una herramienta de modelado y análisis para diseño CAD<sup>12</sup> y CAE<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Computer Aided Design  
<sup>13</sup> Computer Aided Engineering

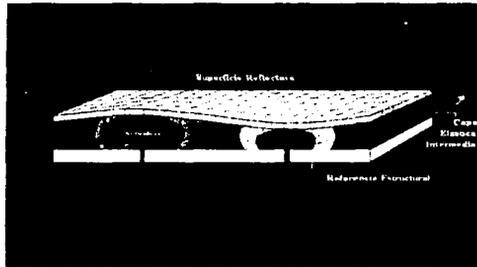
**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

### 3.1.1 Diseño Conceptual

El segmento híbrido [4] está formado por capas de materiales diversos, el objetivo es tener un segmento ligero, rígido y que sea manipulable con el mismo número de actuadores que necesita un menisco del mismo tamaño. Cada capa posee distintas características: una capa reflectora ultradelgada unida a una referencia estructural rígida mediante una capa de material plástico, los actuadores se encuentran embebidos y ejercen su acción en la superficie reflectora a través del material plástico *Figura 3.2*.

La superficie reflectora consiste en una membrana reflectora de vidrio o metal. En lugar de utilizar un material vitrocerámico estable a la temperatura (p.e. ZERODUR) se propone utilizar una membrana de material alternativo de menor costo y corregir las aberraciones térmicas mediante el sistema de actuadores fluidicos. La ventaja de un material como el Zerodur se ven limitadas tomando en cuenta que los segmentos son soportados por una celda de acero, la cual padece deformaciones de alrededor de  $160\mu\text{m}$  [1].

La capa elástica intermedia une de manera continua a la membrana con la referencia estructural rígida y propaga la acción de los actuadores sobre la superficie. Esta capa responde rigidamente contra las fuerzas de corte laterales mientras que lo hace suavemente a las deformaciones axiales de las cavidades. Por otro lado, actúa como un filtro a las frecuencias dañinas del viento logrando que el segmento sea lo suficientemente rígido y autoamortiguado, en otras palabras, que pueda ser manipulado con el mismo número de actuadores que requeriría un menisco del mismo tamaño.



*Figura 3.2 Diseño conceptual.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los actuadores fluidicos, ya sean neumáticos o hidráulicos, consisten en pequeñas cavidades cónicas maquinadas en la superficie estructural que ejercen su acción a sobre el material elástico a través de un diafragma. Este diafragma tiene una doble función: es transparente a los esfuerzos axiales ejercidos por la presión en las cavidades mientras que responde rígidamente a los esfuerzos laterales. Además soporta uniformemente la capa elástica.

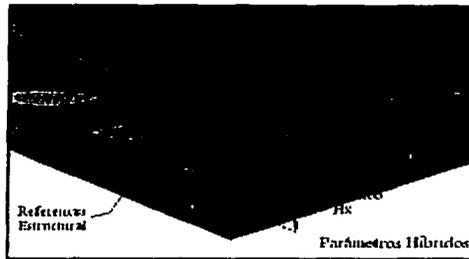


Figura 3.3 Parámetros mecánicos y geométricos.

La Figura 3.3 ilustra los parámetros mecánicos y geométricos que intervienen en el análisis de la propuesta. La búsqueda del diseño óptimo contempla diferentes geometrías y distribuciones de los actuadores.

### 3.1.2 Desempeño de los espejos.

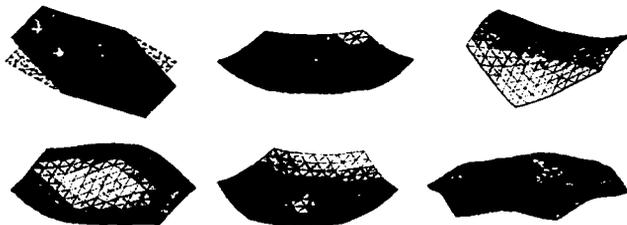
El funcionamiento de los espejos flexibles ha dado excelentes resultados en la simulación. En primer lugar, es posible el control de las deformaciones de la superficie óptica para aberraciones de bajo orden, Figura 3.5. En particular es posible la generación de pistón y tip-tilt en un intervalo de decenas de  $\mu\text{m}$  Figura 3.4. Este resultado es importante puesto que la corrección de estas aberraciones queda a cargo de tres definidores axiales que aun cuando no sean eliminados es factible disminuir su precisión y por lo tanto su costo.



Figura 3.4 Corrección de tip-tilt.

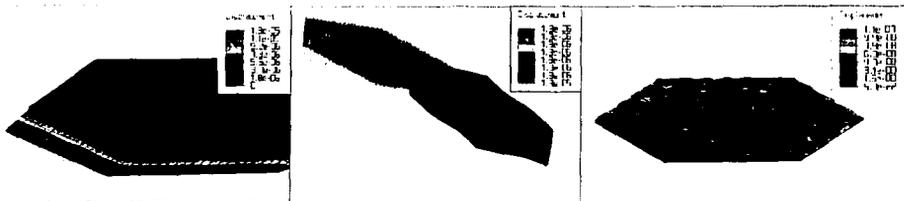
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con 19 actuadores es posible realizar correcciones hasta de 5° orden de Zernike. En la *Figura 3.5* se representan los primeros órdenes de Zernike obtenidas variando las presiones para generar deformaciones de 5µm pico a pico en la superficie de un modelo experimental con 13cm de diámetro mayor y 19 cavidades, la membrana es de vidrio comercial de 1mm de espesor.



*Figura 3.5 Control de las deformaciones en la superficie. Tip-Tilt. Esfericidad. Astigmatismo. Coma. Defoco. Hexafold.*

Los efectos gravitatorios laterales son minimizados por la capa plástica y el diafragma. En la *Figura 3.6* se ilustra el desplazamiento lateral de un segmento de 408kg, 3.5m de diámetro y un vidrio hexagonal con 20mm de espesor. En *Figura 3.6.a* se aprecia un desplazamiento lateral de alrededor de 13µm; en *Figura 3.6.b* las deformaciones padecidas por la superficie óptica y por ultimo en *Figura 3.6.c* la corrección de estas deformaciones con los actuadores fluidicos por debajo de los 20nm RMS. Estos resultados están dentro de las tolerancias establecidas por lo que no es necesario implementar un soporte lateral extra. En la siguiente sección se comparan los resultados con los obtenidos con otras tecnologías para segmentos.



*Figura 3.6 Efectos laterales de la gravedad: (a)corte lateral; (b)deformaciones en la superficie; (c)superficie corregida.*

Uno de los procedimientos más costosos en la manufactura de los espejos es el pulido debido a la alta precisión ( $\lambda/20$ ) y al proceso de parabolización de la superficie. En este sentido, los actuadores fluidicos permiten la disminución en las exigencias de pulido pues se encargan de la corrección de los errores residuales en la superficie. En la *Figura 3.7* se muestra un intento de asferización de una superficie óptica esférica en una superficie parabólica fuera de eje.

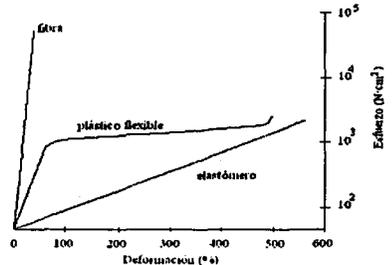


*Figura 3.7 Parabolización de una superficie esférica.*

### 3.1.3 Materiales

Respecto a los materiales de los segmentos híbridos, existen varios candidatos para su construcción. Particularmente para la capa elástica intermedia es factible utilizar elastómeros. Los elastómeros son materiales con un alto porcentaje de deformación (hasta un 500%) *Gráfica 3.2*. El inconveniente principal de estos materiales es que sus propiedades cambian con el envejecimiento.

Además el desacoplamiento de los C.E.T. de las distintas capas ocasiona aberraciones en la superficie. Eventualmente estas aberraciones serán corregidas por el sistema de control de los actuadores. Una alternativa para evitarlo, es la construcción de un segmento híbrido totalmente metálico, esto es que la referencia estructural, la capa elástica intermedia y la membrana óptica sean todas de aluminio. Para hacer esto se propone utilizar espumas metálicas en lugar de elastómeros. Las espumas metálicas presentan un módulo de elasticidad mucho menor que el material del que están compuestas y pueden considerarse como un material elástico ideal si se utilizan en el intervalo lineal de su curva de esfuerzo-deformación. Sin embargo, el rango de desplazamientos es mucho menor que para los elastómeros.

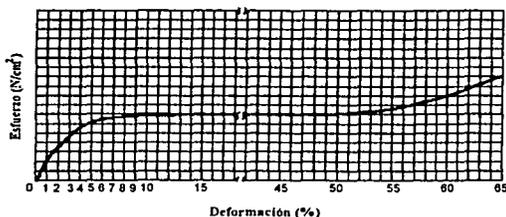


*Gráfica 3.2 Característica Esfuerzo-Deformación para diversos materiales. Se aprecia la capacidad de deformación de los elastómeros.<sup>14</sup>*

<sup>14</sup> After Odian, George; *Principles of Polymerization* 3<sup>rd</sup> ed., J. Wiley, New York, 1991

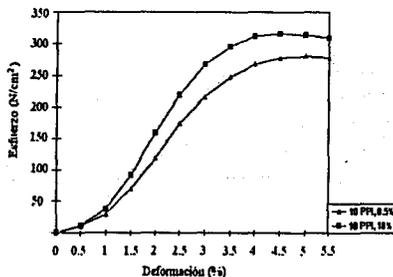
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La *Gráfica 3.3*<sup>15</sup> se muestra una curva Esfuerzo – Deformación representativa de las espumas metálicas. Los valores del Esfuerzo son variables y dependen de la aleación con la que se fabricó la espuma, de su densidad, y del tamaño del poro. Nótese que el porcentaje de deformación es limitado, apenas unas cuantas unidades.



*Gráfica 3.3 Curva Esfuerzo-Deformación representativa de las espumas metálicas.*

En la *Gráfica 3.4*<sup>16</sup> se muestra solamente la región elástica de la curva Esfuerzo-Deformación para dos espumas construidas con la misma aleación (6101-T6), igual tamaño de poro (10 PPI<sup>17</sup>), pero de diferentes densidades.



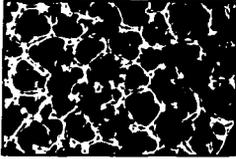
*Gráfica 3.4 Región elástica de las espumas metálicas.*

<sup>15</sup> ERG Materials and Aerospace Corporation. Doucel Aluminium Foam Metal Catalog.

<sup>16</sup> Ibid.

<sup>17</sup> PPI Pores Per Inch (poros por pulgada).

La *Figura 3.8* es una fotografía de la espuma metálica. La simulación numérica de la espuma no es sencilla, el modelo de nodos octaédricos de la *Figura 3.9* asemeja el comportamiento de una espuma metálica



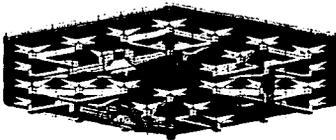
*Figura 3.8 Espuma de Aluminio*



*Figura 3.9 Modelo Numérico de la espuma.*

### 3.1.4 Acoplamiento de los segmentos al espejo primario

Para la interfaz entre la celda del espejo primario y cada uno de los segmentos se propone un hexápodo trabajando axial y lateralmente en un rango menor a los desplazamientos ejercidos por el material plástico. La cara posterior de la referencia estructural esta unida a la estructura ligera y rígida de la *Figura 3.10.b*, (sus dimensiones son exageradas por claridad). El peso de cada segmento híbrido es distribuido sobre 36 puntos por medio de tres estructuras tipo whiffletrees *Figura 3.10.a*, que concentran el peso total en 3 soportes. Estos soportes se encuentran unidos al hexápodo.



(a)



(b)

*Figura 3.10 Interface con la celda del telescopio. Los soportes tipo whiffletree (a) están embebidos en la estructura rígida (b).*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 3.2 Tecnologías para el soporte de los segmentos

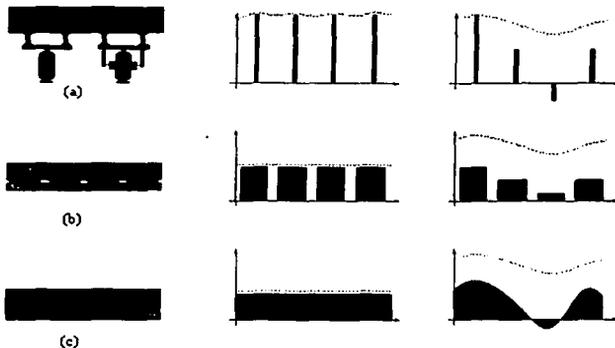


Figura 3.11 Diferentes sistemas de soporte para segmentos: (a) puntual; (b) distribuido; (c) uniforme

### I. Soportes puntuales

Se trata de actuadores electromecánicos *Figura 3.11.a*. Es el caso de los whiffletree *Figura 2.5* similares a los que se utilizan en el GTC y los telescopios Keck. Tres puntos de apoyo distribuyen su acción en 12 soportes, en total son 36 puntos de apoyo para el segmento. Este tipo de apoyos generan un rizo más acentuado en la superficie debido a la acción de la gravedad. Para el soporte de superficies delgadas es necesario utilizar un número muy grande de puntos de apoyo para garantizar su rigidez y control. El soporte lateral es pasivo, queda a cargo de un mástil que une rigidamente al segmento con la celda del telescopio.

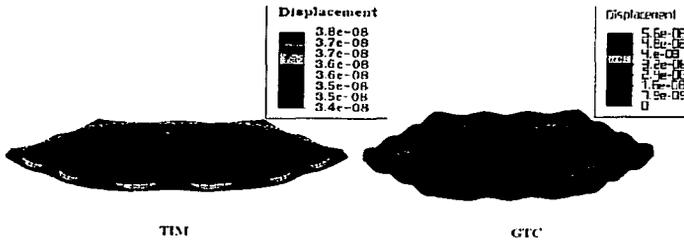
### II. Soportes distribuidos

Este concepto se aplica exitosamente en el telescopio 2.1m de San Pedro Mártir [5] y es el que se propone en el capítulo 2 para los meniscos de 75mm de Zerodur del TIM [3]. La distribución de las fuerzas es homogénea puesto que los 19 actuadores neumáticos cubren casi totalmente la cara posterior del segmento y al mismo tiempo soportan la mayor parte del peso. El cambio diferencial en la presión de las bolsas genera deformaciones en la superficie *Figura 3.11.b*. Para dar rigidez al segmento, cada actuador neumático tiene asociado un actuador hidráulico a la misma presión.

### III. Soportes continuos

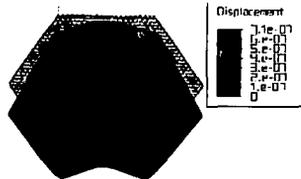
Para la propuesta presentada en este capítulo un medio flexible sostiene continuamente a la superficie reflectora, al mismo tiempo que distribuye, transmite y atenúa los esfuerzos de los actuadores haciendo que un desplazamiento 'tosco' de los mismos genere un cambio fino y preciso en la membrana *Figura 3.11.c*. El cambio de presión en las cavidades ejerce esfuerzos positivos o negativos sobre la superficie. Este arreglo de materiales brinda rigidez al segmento y amortigua el golpeo del viento.

En la *Figura 3.12* se observan las deformaciones axiales para la propuesta neumática TIM y de un segmento tipo GTC con soportes puntuales. Ambos segmentos son de Zerodur y tienen un espesor de 75mm. El rizo en la superficie para un segmento TIM con bolsas neumáticas es menor de los 10nm mientras que para un GTC con apoyos puntuales es de alrededor de los 60nm. En el caso de los espejos flexibles las huellas de los actuadores embebidos quedan ocultas por los errores residuales de la superficie por debajo de 40nm RMS.



*Figura 3.12 Efectos axiales de la gravedad sobre los segmentos.*

El soporte lateral pasivo de un segmento tipo GTC ejerce deformaciones alrededor de los 700nm sobre la superficie *Figura 3.13* cuando el segmento mira al horizonte. Los estudios preliminares de esta propuesta han estimado cortes laterales de alrededor de los 68  $\mu\text{m}$  [2]. Por su parte, el análisis de una membrana de dimensiones mucho mayores expuesto anteriormente *Figura 3.6* presenta cortes laterales de 13 $\mu\text{m}$ .



*Figura 3.13 Menisco tipo GTC. Efectos gravitatorios laterales.*

Recapitulando, las membranas híbridas ofrecen muchas ventajas respecto a las alternativas utilizadas hoy en día. En primer lugar su bajo peso: un menisco de Zerodur (75mm de espesor) tiene un peso de 460kg, mientras que un espejo flexible de las mismas dimensiones pesa aproximadamente 80 kg. Sin embargo, estos últimos poseen una rigidez equivalente a la de un espejo masivo sin necesidad de aumentar al número de actuadores gracias a la capa intermedia que le otorga un factor de amortiguamiento contra el viento.

Los cortes laterales son mínimos y pueden ser despreciados, mientras que la capacidad de generar tip-tilt con las cavidades neumáticas disminuye la precisión necesaria del soporte axial externo.

Hay que señalar que el control de la superficie para un espejo con meniscos de Zerodur, toma como referencia la alta estabilidad térmica del material. En el caso de las membranas híbridas, dada su susceptibilidad a los cambios de temperatura es indispensable contar con un sensor de frente de onda operando continuamente.

Estas características hacen de las membranas híbridas una alternativa atractiva para la construcción de los telescopios gigantes del futuro. Construir segmentos híbridos de mayor tamaño reducirá la complejidad del control para dichos telescopios.

Es importante resaltar el excelente desempeño de los actuadores fluidicos, ya sea para el soporte continuo en una membrana o para un soporte distribuido en un menisco vitrocerámico, en cualquier caso se comprueba que con 19 actuadores es posible hacer correcciones activas. Los actuadores neumáticos presentan un costo mucho menor que los electromecánicos. En el siguiente capítulo se describe el funcionamiento de un Multiplexor Amplificador Fluidico para controlar las presiones en los actuadores.

*Bibliografía y referencias*

- [1] Farah, A. et. al. "Structure Analysis of the Primary Mirror Support for de TIM, using Computer-Aided Finite Element Method" Proceedings of SPIE Vol. 4004. p. 568, 2000.
- [2] GTC. "Primary Mirror. Preliminary Design Review. Segment Support Subsystem" (OP-M1-SS). España, May 27-28,1999. p. 42.
- [3] Ruiz, E. et. al. "Mirror cell and active support of the Mexican infrared optical telescope (TIM)" Proceedings of SPIE Vol. 3352 pp. 544-550 1998.
- [4] Ruiz, E. et. al. "Large hybrid membrane mirrors" Proceedings of SPIE, 2002 (en prensa).
- [5] Salas, L. et. al., "Active Mirror Support for the 2.1m Telescope at SPM" Applied Optics, Vol. 36 16, 3708-3716, 1997
- [6] Tyson, R. "Principles o Adaptive Optics" Segunda Edición. Academic Press. Estados Unidos 1998. pp. 214-219

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1946  
JAN 10 1946  
RECEIVED  
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE  
WASHINGTON, D. C.

## 4 Amplificador Multiplexor Fluídico

En el capítulo anterior se propone un nuevo tipo de espejos flexibles en los que es posible deformar la superficie con el mismo número de actuadores que utiliza un espejo masivo de las mismas dimensiones, además se resaltan las ventajas del soporte neumático sobre el soporte electromecánico. Para que estas deformaciones tengan lugar es necesario un sistema que controle los cambios de presión en los actuadores manteniéndola en el valor deseado o presión de referencia suministrada externamente. En este capítulo se presenta el diseño del Amplificador Multiplexor Fluídico que tiene a su cargo regular activamente la presión en cada una de las 19 cavidades de un segmento flexible para mantenerla en el valor deseado. En la *Figura 4.1* se aprecia un prototipo experimental a escala.

Uno de los principales elementos del sistema son las electroválvulas de bajo costo y potencia de operación que suministran el fluido a los actuadores, estas se utilizaron como alternativa a los reguladores comerciales de presión pues experimentalmente se comprobó que presentan una característica lineal y su desempeño es mucho mejor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

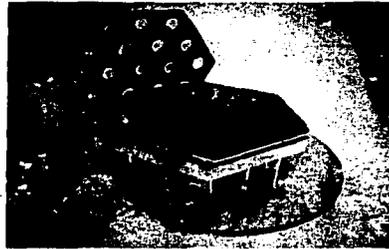


Figura 4.1 Prototipo experimental a escala.

## 4.1 Funcionamiento básico

La idea básica del Amplificador Multiplexor Fluido AMF consiste en un regulador activo de presión para cada actuador. En la *Figura 4.2* se ilustra su funcionamiento.

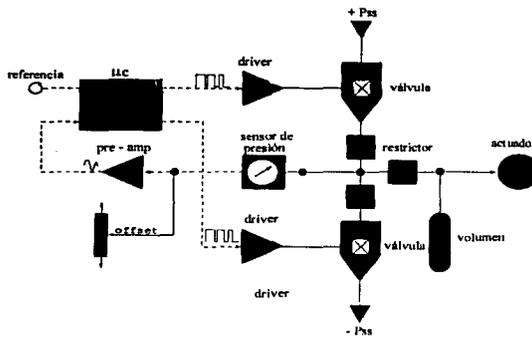


Figura 4.2 Funcionamiento básico

Un microcontrolador se encarga del funcionamiento del AMF., la ventaja principal radica en tener las señales integradas en un solo circuito. El sistema cuenta con un par de electroválvulas acopladas suministrando fluido presurizado a  $\pm 1$  atm y un sensor de presión que trabaja en un intervalo de  $\pm 30$ KPa. Por medio de un algoritmo se logra un control de la presión en el orden de 0.1%, en cada una de los actuadores.

Para fines experimentales un solo circuito neumático proporciona los cambios de presión a cada una de las cavidades para hacer esto se habilita una cavidad a la vez *Figura 4.3*. El microcontrolador abre el circuito neumático correspondiente a la cavidad que se va a corregir, procesa las señales de presión y referencia y envía una señal modulada en ancho de pulso al inyector ( $V_n$ ) correspondiente a la cavidad ( $C_n$ ) que se va a corregir, procesa las señales de presión y referencia y envía la señal modulada en ancho de pulso al circuito neumático ya sea para suministrar o extraer fluido de la cavidad y corregir la presión. Las señales neumáticas y de presión son multiplexadas para cada uno de los 19 cavidades ( $C1, C2, \dots, C19$ ) y el proceso se repite.

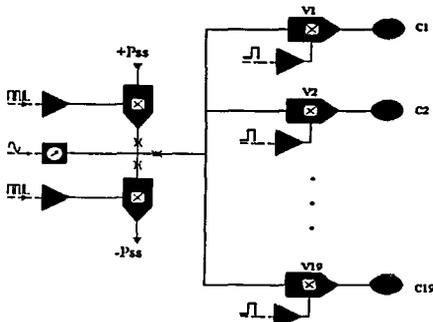


Figura 4.3 Señales neumáticas multiplexadas.

El sistema esta formado por elementos neumáticos y electrónicos, en la figura se aprecia que los primeros están interconectados mediante una línea continua \_\_\_\_\_ mientras que los segundos se interconectan con una línea discontinua -----. El control de la etapa neumática queda a cargo de la electrónica del sistema.

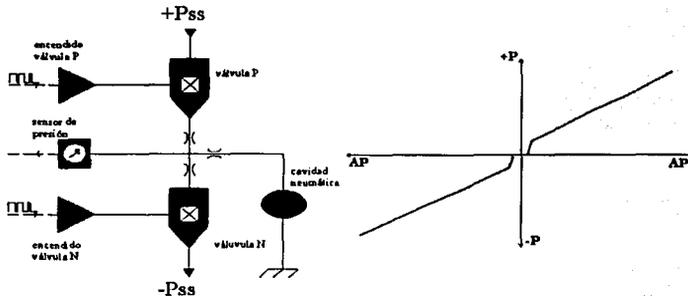
## 4.2 Etapa neumática

Uno de los elementos principales de este sistema son los actuadores neumáticos, formados por las cavidades embebidas *Figura 3.2* y el circuito encargado de generar los cambios de presión que deforman la superficie.

### 4.2.1 Circuito neumático

Los cambios de presión en la cavidad neumática son generados por un par de electroválvulas acopladas en configuración Push – Pull. Es decir, su funcionamiento es semejante al de un amplificador electrónico clase B. La válvula P suministra el fluido hacia el actuador para los incrementos de presión positivos ( $+\Delta P$ ) y la válvula N extrae fluido del actuador para incrementos negativos ( $-\Delta P$ ) y no es necesario un flujo permanente ya que las válvulas solo funcionan cuando esta presente la señal de entrada. Además su potencia de operación es baja.

La señal de transferencia para esta configuración *Figura 4.4* presenta un 'intervalo' muerto en el cruce por cero debido a las características de la electroválvula que se describen en la siguiente sección. Este intervalo muerto limita la precisión que se puede alcanzar en la corrección. Aunque para fines experimentales no es determinante, para su aplicación en el sistema activo del telescopio se tendrá que utilizar una tabla de búsqueda, que habilite ambas electroválvulas aprovechando la diferencia de respuesta que presentan de acuerdo a la presión del fluido que alimentan o bien cambiar su configuración.

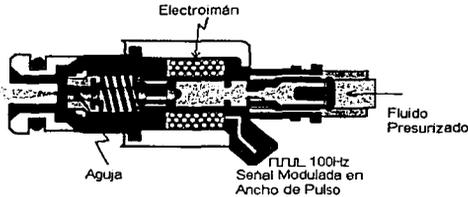


*Figura 4.4 Circuito neumático. La característica de funcionamiento para el aire.*



### 4.2.2 Electroválvulas

Para la distribución del fluido presurizado a los actuadores se probaron los inyectores neumáticos como alternativa a los reguladores comerciales basados en motores de pasos y que en la práctica han presentado serios problemas de linealidad. El inyector no es más que una válvula controlada electrónicamente. Básicamente consiste en un electroimán que desplaza una aguja permitiendo la entrada o salida del fluido a la cavidad. Cuando el campo magnético cesa, la aguja regresa a su posición original gracias a la acción de un resorte *Figura 4.5*.



*Figura 4.5 Electroválvula.*

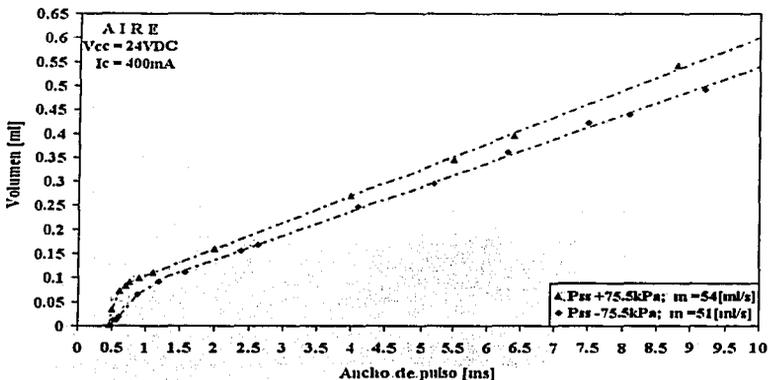
El volumen de fluido que penetra al actuador esta en función del tiempo que permanece abierta la válvula, es decir, depende del ancho de pulso de la señal que habilita al inyector y de la presión del fluido. Las características de funcionamiento obtenidas experimentalmente para diferentes fluidos (aire, agua, aceite) se muestran en las siguientes gráficas. El nivel de referencia al cual esta presurizado el fluido es la presión ambiente *Pa*.



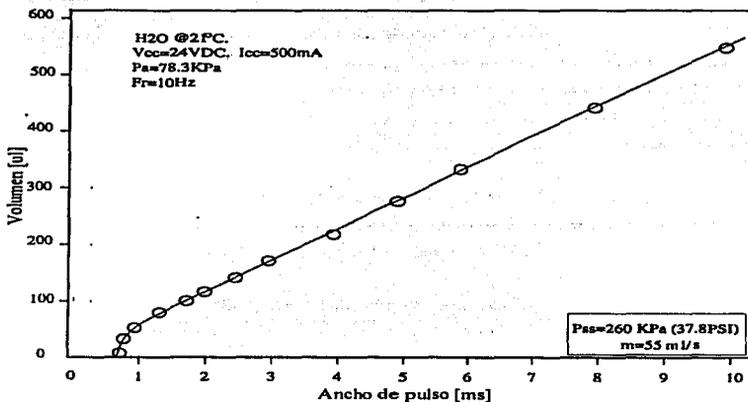
*Figura 4.6 Electroválvula.*

En las tres gráficas se observa que las válvulas no se abren inmediatamente, requieren de un pulso mínimo. Para los valores de voltaje y corriente mostrados, este pulso es de  $600\mu s$ . Este intervalo muerto se debe a las características inductivas de la electroválvula y a la constante de tiempo del sistema aguja-resorte.

La *Gráfica 4.1* representa la respuesta utilizando aire presurizado a  $\pm 75.5kPa$ . La pendiente o flujo, es diferente dependiendo del signo de la presión, es decir, que las respuestas no son simétricas, el flujo es ligeramente menor para el vacío. Esta diferencia puede ser útil si se abren las dos válvulas al mismo tiempo, el volumen neto que se entrega al actuador sería igual a la diferencia entre el volumen suministrado por cada una. En la *Gráfica 4.2* las mediciones fueron tomadas utilizando agua a  $260 kPa$  y por último, la *Gráfica 4.3* se trata de un fluido DOT 3 SAE-J1703. La respuesta de los inyectores puede considerarse lineal a partir del *intervalo muerto*: el volumen de fluido que suministran es proporcional al ciclo de trabajo de la señal de encendido.

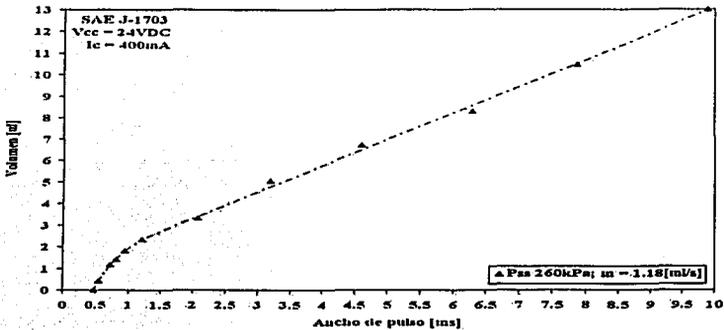


Gráfica 4.1 Respuesta de la electroválvula: Aire.



Gráfica 4.2 Respuesta de la electroválvula: Agua.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



Gráfica 4.3 Respuesta de la electroválvula: LF.

El flujo [ml/s] varía de un fluido a otro, este depende de la presión del sistema así como de los parámetros del fluido tales como densidad y viscosidad. El SAE J-1703 es un fluido incompresible e inerte, los experimentos se realizaron a temperatura ambiente y en estas condiciones su viscosidad es mucho mayor que la del agua a la misma temperatura.

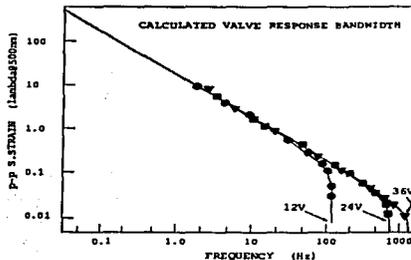
Para volúmenes pequeños el aire es una buena opción, sin embargo para volúmenes mayores un fluido de baja viscosidad funcionará mejor.

El ancho de banda de los inyectores depende del voltaje con el que sean polarizados. En la Gráfica 4.4 en la siguiente página se observa la corrección del frente de onda calculada en fracciones de  $\lambda$  (500nm) para diferentes voltajes de polarización de los inyectores.

### 4.3 Etapa electrónica

En la Figura 4.7 se muestra la etapa electrónica del Amplificador Multiplexor Fluido. Esta consiste en la etapa de sensado y acondicionamiento de las señales de presión, multiplexado analógico (U4,U5) de las 19 señales para entregarlas a el microcontrolador (U1), en donde se lleva a cabo la conversión analógica digital y se procesa el algoritmo de control que calcula la señal modulada en ancho de pulso recibida por circuito que se encarga de abrir la electroválvula correspondiente Figura 4.9, así como las señales de decodificación para seleccionar el actuador en proceso.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



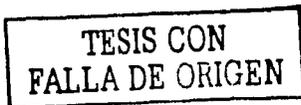
Gráfica 4.4 Ancho de banda de los inyectores.

Un microcontrolador se encarga de manejar las electroválvulas con base en la señal de referencia y las señales de presión provenientes de las cavidades neumáticas, de esta manera el conjunto de señales del amplificador multiplexor fluido es integrado en un solo circuito. Se eligió utilizar un microcontrolador ya que al implementarse en el TIM, cada segmento contara con un sistema multiplexor fluido integrado y las presiones de referencia procesadas en el lazo óptico serán enviadas a cada espejo vía únicamente 19 canales de comunicación. El microcontrolador seleccionado es un PIC16F877 en el Apéndice A se incluye la hoja de especificaciones y su arquitectura interna.

Las características más importantes y que determinaron su selección son: 8Kx14 palabras de memoria FLASH de programa; 368x8 bytes de memoria de programa (RAM). Es del tipo RISC (*Reduced Instruction Set Computer*<sup>18</sup>) con solo 35 instrucciones que se ejecutan en un solo ciclo de instrucción (200ns para una frecuencia de 20MHz), cuenta con múltiples fuentes de interrupción, temporizadores y 8 canales de conversión analógica digital de 10bits, además de la opción de grabarse en circuito vía dos pines. El PIC16F877 es una opción sencilla y económica, la idea es que las señales de los 19 actuadores sean concentradas y procesadas por el microcontrolador en el menor tiempo posible, además la conversión de las señales analógicas se hace dentro del microcontrolador con una resolución de 10 bits suficiente para fines experimentales. Básicamente la tarea del microcontrolador consiste en:

- seleccionar el actuador (*puerto C<0:4>*);
- adquirir la señal analógica correspondiente a la presión y la señal de referencia (*AN<4,6>*);
- hacer la conversión analógica digital de dichas señales;
- modular la señal de salida con base en el error del sistema (*MAP+, MAP-*);
- seleccionar el circuito neumático correspondiente para que reciba la señal modulada.

<sup>18</sup> Conjunto reducido de instrucciones.



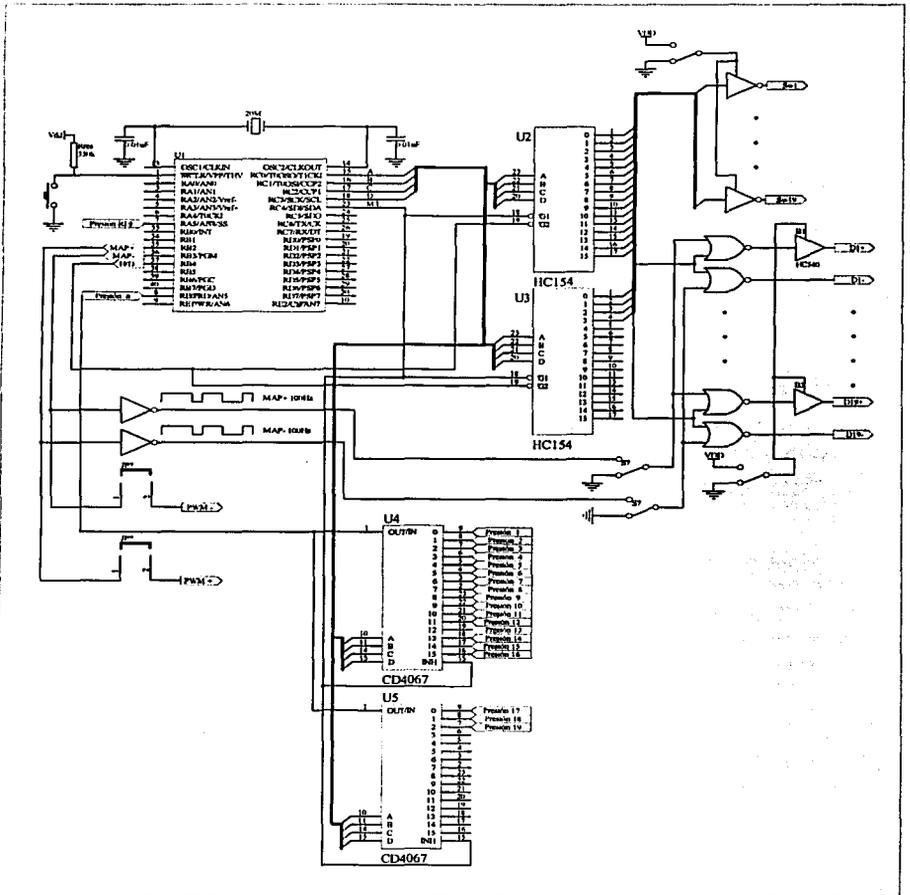


Figura 4.7 Tarjeta electrónica. Sensado y acondicionamiento de las señales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 4.3.1 Multiplexado y decodificación (selección del actuador)

El microcontrolador envía una palabra de 5 bits Puerto  $C<0:4>$  para la selección del actuador que va a ser sentido y corregido. La señal es recibida por el conjunto de multiplexores de la tarjeta. Los multiplexores analógicos U4, U5 (CD4067) direccionan la presión amplificada del actuador en proceso al canal de conversión analógica digital en el microcontrolador. La multiplexación es necesaria cuando cada actuador cuenta con un sensor propio, en esta etapa experimental solo existe un sensor en el canal principal. Una vez que se han procesado los datos y se tiene la señal de control el pin H/D, habilita los decodificadores digitales para seleccionar el manejador (*driver*) que habilita el circuito neumático correspondiente a ese actuador.

Dado que el prototipo es experimental la tarjeta es modular, se propone que funcione como multiplexor con un solo circuito neumático que precargue la presión y 19 electroválvulas, una para cada cavidad. Para aplicaciones de mayor velocidad, cada cavidad contará con su propio circuito neumático, esta propuesta se describe más adelante.

### 4.3.2 Conversión Analógica Digital

La señal es adquirida y convertida dentro el microcontrolador. La entrada analógica carga un capacitor de muestreo y retención interno. La salida de este capacitor es la entrada del convertidor. El convertidor genera una salida digital de 10 bits correspondiente a la entrada analógica, la conversión se lleva a cabo por el método de aproximaciones sucesivas.

Es necesario que el capacitor de muestreo  $C_{HOLD}$  se cargue al nivel del voltaje de la señal analógica de entrada  $V_{REF}$  para alcanzar la precisión especificada del convertidor. El siguiente circuito ilustra las impedancias presentes en el momento de la conversión. Para determinar el tiempo de carga  $T_C$  del capacitor  $C_{HOLD}$  es necesario considerar la resistencia de la fuente analógica  $R_S$ , la resistencia de interconexión  $R_{IC}$ , así como la resistencia del interruptor de muestreo  $R_{SS}$ , esta última depende del voltaje de polarización  $V_{DD}$  del microcontrolador.

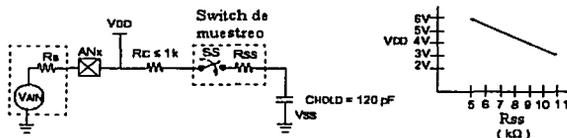
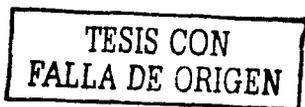


Figura 4.8 Modelo de la entrada analógica[7, pag.. 429]



El voltaje  $V_{HOLD}$  del capacitor se calcula como:

$$V_{HOLD} = \left( V_{REF} - \frac{V_{REF}}{2048} \right) \left( 1 - e^{-\frac{T_C}{C_{HOLD}(R_S + R_{IC} + R_{SS})}} \right)$$

Para los valores:  $R_{SS} = 7k\Omega$  ( $V_{DD} = 5V$ ),  $R_S = 50 \Omega$ ,  $C_{HOLD} = 150pF$ , se tiene que el tiempo de carga  $T_C$  es igual a:

$$T_C = -C_{HOLD} (R_S + R_{IC} + R_{SS}) \ln\left(\frac{1}{2047}\right) = -120p(50 + 1K + 7K) \ln\left(\frac{1}{2047}\right) = 7.4\mu s$$

El tiempo de adquisición  $T_{ADQ}$  total es el tiempo de carga del capacitor ( $T_C = 7.4\mu s$ ) más  $2 \mu s$  de establecimiento del amplificador de entrada, es decir, alrededor de  $10\mu s$ . Este es programado en uno de los temporizadores del PIC.

En el registro  $ADCON0$  se configuran los pines que funcionarán como canales analógicos, el pin  $RA5$  para la presión de referencia (PR) y el pin  $RE0$  para la presión correspondiente al actuador en proceso (PN). El tiempo de

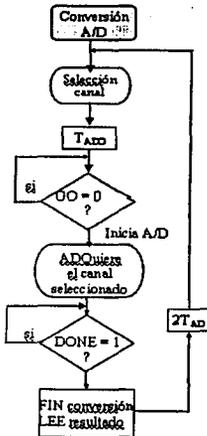


Figura 4.9 Conversión A/D

conversión  $T_{AD}$  por bit mínimo de  $1.6\mu s$  (equivalente a 32 veces el tiempo del oscilador) se programa en el registro  $ADCON1$ . Una vez seleccionado el canal de conversión, es necesario esperar el  $T_{ADQ}$  necesario para que el capacitor se cargue al nivel de referencia, este tiempo se programa en el temporizador interno  $TMRO$ . El proceso de conversión se inicia cuando se establece la bandera  $GO/DONE$ , al finalizar la conversión el microcontrolador limpia este bit. El resultado de la conversión de 10 bits se lee en los registros  $ADRESH$  y  $ADRESL$  de donde se mueve a las variables correspondientes  $PN$  (registros  $PNH$ ,  $PNL$ )  $PR$  ( $PRH$ ,  $PRL$ ).

Debido a que cada bit es evaluado en un pulso de reloj  $T_{AD}$ , la señal digital sera procesada en solamente  $10 T_{AD}$ , no obstante, una vez concluida una conversión es necesario dejar pasar al menos  $2T_{AD}$  para descargar el capacitor de retención y muestreo, tiempo en el que no se conecta a ningún canal.

El tiempo de conversión total aproximado es de  $24 \mu s$  y el paso de la señal entregada por el convertidor es de  $4.88 [mV/bit]$ , lo que equivale a  $58.59 [Pa/bit]$ .

### 4.3.3 Modulación de Ancho de Pulso

Las electroválvulas acopladas en el circuito neumático son controladas por una señal de 100 hertz cada una. Esta señal es modulada en ancho de pulso por el microcontrolador, tiene una resolución de 10 bits y el ciclo de trabajo es proporcional al valor del error entre la señal de presión actual y la señal de referencia. *Figura 4.10.*

El funcionamiento Push - Pull de las válvulas es controlado por el microcontrolador. Una vez adquiridas las presión de referencia y la del actuador en proceso son comparadas para determinar si es necesario suministrar o extraer fluido, en ese caso el valor absoluto del error se utiliza para modular a la señal de 100Hz, y el signo determina que válvula será abierta, errores negativos significan que la presión en el actuador PN es mayor que la referencia PR, por lo tanto hay que extraer fluido y para hacerlo el microcontrolador abre la válvula presurizada negativamente con la señal modulada en ancho de pulso  $MAP -$ . Mientras que para un error positivo se suministra fluido al actuador a través de la válvula presurizada positivamente con la señal  $MAP +$ .

El diagrama de flujo *Figura 4.10* representa el algoritmo para modular la señal en ancho de pulso, el proceso consiste en decrementar y comparar el contenido del registro MAP con el ERROR cuando estas son iguales la señal MAP cambia de cero a uno manteniéndose así hasta completar un ciclo completo. La rutina es equivalente para modular la señal  $-MAP$ .

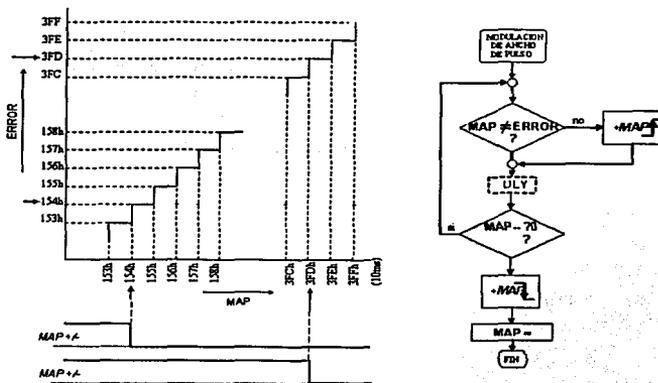


Figura 4.10 Proceso de modulación

El tiempo que permanece abierta la electroválvula determina el volumen de aire que entra o sale del actuador y que se manifiesta con deformaciones en la superficie. La señal modulada por el microcontrolador tiene un ciclo de trabajo mínimo de 600µs para garantizar que efectivamente se abra la electroválvula. La sensibilidad a los cambios de presión en el actuador esta determinada por el paso del convertidor (58.59 Pa/bit). Una vez ajustada la presión de ese actuador al valor de referencia, el microcontrolador selecciona otra cavidad.

### 4.3.4 Sensado y acondicionamiento de las señales

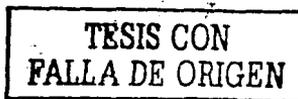
La variable de interés en el sistema es la presión en la cavidad, para ajustarla al valor deseado es necesario convertirla en una señal eléctrica empleando un transductor. Un transductor ejecuta una transformación entre dos variables físicas sean estas eléctricas, magnéticas, térmicas, mecánicas, ópticas o químicas; por lo general una de las señales que intervienen es eléctrica (corriente o voltaje). Los transductores se clasifican en sensores<sup>19</sup> y actuadores, los sensores transforman una variable física cualquiera en un voltaje o corriente, los actuadores por su parte transforman una señal eléctrica en otra variable física.

Para medir la presión en los actuadores se utiliza un sensor de presión de estado sólido con tecnología piezoresistiva NPC-1210 (Apéndice A). Las características más sobresalientes que determinaron su selección son:

- o térmicamente compensado,
- o entrada diferencial,
- o empaque compacto tipo DIP para montarse en la tarjeta de circuito impreso,
- o intervalo de funcionamiento de 5psi.

Físicamente se trata de cuatro piezoresistencias (*strain gages*), es decir que un cambio de volumen genera un cambio en su resistencia eléctrica. Estas se encuentran configuradas en un puente de Wheatstone con la finalidad de detectar los pequeños cambios en el valor de la resistencia y entrega un voltaje de salida. Las *strain gages* están maquinadas sobre una membrana de silicón, el cual es un material óptimo con una elasticidad extremadamente buena dentro de su intervalo de operación.

<sup>19</sup> Aun cuando *sensor* y *transductor* son empleados indistintamente, el termino sensor tiene un significado más amplio. El sensor es un dispositivo que detecta y transmite adecuadamente las magnitudes físicas que por su naturaleza débil o temporal no son percibidas por nuestros sentidos. Un transductor en cambio solo sugiere que la entrada y la salida no son iguales [8, pag. 3].



#### 4.3.4.1 Polarización del sensor

Para compensar los errores de temperatura, se prefiere una fuente de corriente constante en lugar de un voltaje constante, a pesar de que es más sencillo trabajar con este último. No obstante, dado que los cambios de temperatura  $\tau$  afectan a la sensibilidad  $S(\tau)$  y a la resistencia de puente  $R_p(\tau)$  del transductor. La señal de salida del sensor o *Full Scale Output FSO* es producto de la sensibilidad  $S(\tau)$  y el voltaje  $V_p$  a través del puente. Si el circuito es alimentado con un voltaje constante, la única fuente de error es la sensibilidad, es decir:

$$FSO(\tau) = S(\tau) \cdot V_p$$

Si se emplea corriente constante el voltaje  $V_p$  es el producto de la corriente  $I$  aplicada y la resistencia de puente  $R_p(\tau)$ . En ese caso, la salida del sensor esta dada por:

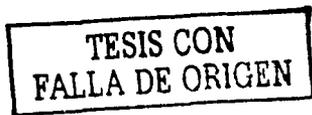
$$FSO(\tau) = S(\tau) \cdot R_p(\tau) \cdot I$$

En el proceso de manufactura, el coeficiente de temperatura de la resistencia de puente CTR así como el coeficiente de temperatura de la sensibilidad CTS son ajustados de tal manera que  $CTR = -CTS$ , es decir que, mientras que la sensibilidad disminuye con la temperatura la resistencia de puente aumenta compensando así la salida del sistema sin necesidad de hacerlo externamente [6].

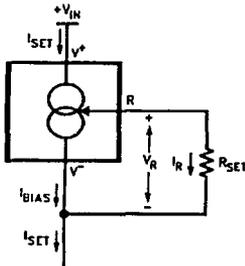
La *Figura 4.12* muestra la etapa de sensado y acondicionamiento de las presiones en las cavidades. El transductor esta representado por el puente de resistencias que junto con la resistencia de ganancia conforma al sensor. La corriente de 1.5mA es suministrada por el circuito integrado LM334Z. El LM334Z es una fuente de corriente ajustable de tres terminales, compacta y con una excelente regulación de corriente.

Características de funcionamiento LM334Z	Mínima	Máxima
Voltaje de operación	1V	40 V
Corriente de ajuste	1 $\mu$ A	10 mA
Temperatura de funcionamiento	0°C	40°C
Regulación de corriente	0.03%/V	

Para regular la corriente es necesario únicamente un resistor externo, la corriente ajuste que suministra el circuito LM334 ( $I_{SET}$ ) es la suma de la corriente a través del resistor de ajuste ( $I_R$ ) y la corriente de polarización del circuito ( $I_{BIAS}$ ) *Figura 4.11*.



$$I_{SET} = I_R + I_{BIAS} = \frac{V_R}{R_{SET}} + I_{BIAS}$$



En el Apéndice A se muestra una gráfica de la razón de estas corrientes  $I_{SET} / I_{BIAS}$ . La corriente que pasa por  $R_{SET}$  es determinada por  $V_R$  el cual para una temperatura de 25°C es de 64mV (apéndice A). Como  $I_{BIAS}$  es un porcentaje de  $I_{SET}$  la ecuación se convierte en:

$$I_{SET} = \frac{V_R}{R_{SET}} \left( \frac{n}{n-1} \right)$$

Donde para una  $I_{SET} = 1.5\text{mA}$ ,  $n = 15$ , de donde  $R_{SET}$  es aproximadamente igual a 47  $\Omega$ . Es importante notar que las la corriente de ajuste es susceptible a los cambios de temperatura, no obstante este efecto disminuye si se utiliza una fuente con empaque de metal que disipa la energía generada.

Figura 4.11 Fuente de corriente.

Para incrementar el nivel de la señal entregada por el transductor se utiliza un amplificador de instrumentación, en esta etapa experimental cada amplificador de se implemento utilizando el circuito TL074. El circuito se muestra en la Figura 4.12. Consiste en cuatro amplificadores operacionales de entrada JFET para reducir el ruido a la entrada acoplados en el circuito mostrado en la figura. El amplificador esta polarizado a +/-12V.

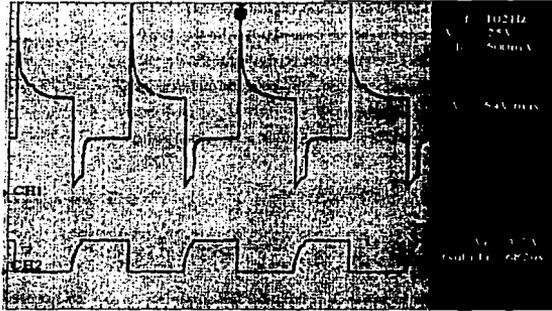
Esta configuración tiene varias ventajas. Por un lado los dos amplificadores seguidores a la entrada de la señal ofrecen una alta impedancia que evita caídas en el nivel de la señal entregada por el transductor (impedancia de salida de 4k $\Omega$ ) y la siguiente etapa con la entrada diferencial ofrece un rechazo en modo común CMRR<sup>20</sup> de 86dB, obteniéndose una reducción considerable del ruido.

La resistencia de ganancia  $R_g$  viene integrada en el sensor (6.7 k $\Omega$ ) para normalizar la FSO. La ganancia de la amplificación es de alrededor de 25 ( $R = 82$  k $\Omega$ ). La función del amplificador seguidor y la resistencia variable de precisión (20k $\Omega$  para limitar la corriente) es ajustar el cero del sistema (0kPa) en 2.5V, de este modo se tiene una excursión de 0 -5V para un intervalo de +/- 30kPa.

<sup>20</sup> Common Mode Rejection Ratio

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN





Gráfica 4.5 Voltaje de colector C111 y voltaje de emisor C112.

En la Gráfica 4.5 se observa que al comenzar a conducir el transistor, el voltaje de colector cae abruptamente y alrededor de los 700 $\mu$ s alcanza su valor nominal ( $V_c = V_{cc} - V_{ce} - V_e$ ). Esta caída abrupta del voltaje es debida a la inductancia del circuito y a la masa de la aguja, en otras palabras la electroválvula no se abre inmediatamente, requiere de un pulso mínimo de 700  $\mu$ s. Cuando la señal en la base es cero, la energía almacenada en el inductor se disipa vía la resistencia  $R_d$ .

Para aplicaciones de mayor velocidad es posible disminuir el tiempo de respuesta del sistema si aumenta el voltaje de polarización Gráfica 4.4. La respuesta en el inyector es mejorada si se le implementa un circuito que suministre los pulsos de corriente necesarios para contrarrestar la inercia mecánica del sistema de masa resorte interno de la válvula.

#### 4.4 Polarización del MAF

Para alimentar a la etapa electrónica se utiliza una fuente de voltaje conmutada, con la que se suministran los 5V (15A máximo) necesarios para los circuitos digitales. Los +12V (9A máx.) y -12V (0.5A máx.) para los circuitos amplificadores de instrumentación (19 en total) y el multiplexor analógico.

La referencia del convertidor analógico digital del microcontrolador esta programada para que sea el voltaje de alimentación del PIC, por lo que se utiliza un regulador lineal 7805 para suministrar los 5V.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con el fin de evitar daños en el convertidor analógico digital provocados por un sobrevoltaje, a la entrada del canal Pn se coloca el arreglo de diodos D=1N914 ( $I_{0max}=150Am$ ;  $V_{Fmax}=0.62V$ ) mostrado en la siguiente figura. En caso de ocurrir una falla en el sistema, este circuito no permite que la señal entregada al convertidor se exceda del intervalo  $(-0.6V,5.6V)$ , el cual esta dentro de los límites de operación del PIC, evitándose que sufra algún daño. La  $R_i$  ( $10 \Omega$ ) limita la corriente.

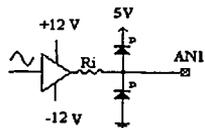


Figura 4.14 Circuito de protección.

## 4.5 Pruebas y Resultados

Las pruebas se llevaron a cabo con aire la señal de referencia fue suministrada por un generador de señales. En las gráficas de osciloscopio se aprecia la capacidad del amplificador multiplexor fluido para seguir la señal de referencia, la frecuencia de la señal de prueba es de 981mHz por encima de las frecuencias de óptica activa (0.3Hz). El circuito neumático se encuentra presurizado a  $\pm Pa$  (Pa aproximadamente igual a 75.5kPa), y la presión de referencia varía entre  $\pm 23$  kPa (3.8Vpp). En la figura la señal de referencia se encuentra en el canal 1 del osciloscopio, mientras que el canal dos es la señal de presión del actuador. La diferencia entre los tiempos de subida (79.35ms) y bajada (179.4ms) de la señal del sensor es reflejo de la falta de simetría en la respuesta de las electroválvulas. Además la precisión en el seguimiento de la señal esta dentro de tolerancia determinada por el convertidor (0.1%).

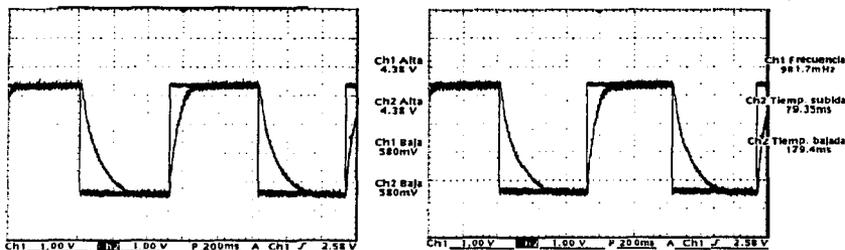
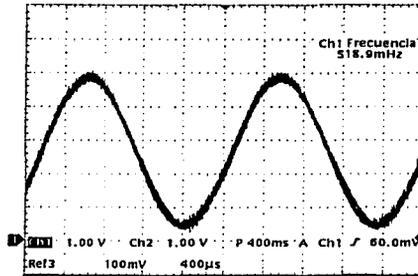


Figura 4.15 Respuesta del AMF





TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.16 Respuesta del AMF.

En la gráfica se observa que la señal de presión en el actuador CH2 sigue a la referencia suministrada por un generador de señales. En la figura se grafican ambas señales, el canal 1 CH1 esta superpuesta al canal 2 CH2. La frecuencia de la señal es del orden de 0.6Hz.

### 4.6 Versión final

En la versión de alta velocidad del sistema para aplicaciones adaptativas será necesario que cada actuador tenga su propio circuito neumático, es decir que se requieren un total de 38 señales moduladas en ancho de pulso para 19 actuadores. Además un convertidor analógico digital de 16 bits para mejorará la sensibilidad del sistema (1Pa/b) y es menester hacer el procesamiento correspondiente del ruido (1/f y blanco). Por un lado un procesamiento analógico con un doble muestreo correlacionado CDS<sup>21</sup> elimina el ruido de baja frecuencia 1/f también llamado ruido de centelleo (*flickering noise*) que afecta principalmente a los elementos de estado sólido, este método consiste en tomar primeramente una muestra del ruido y después de un tiempo otra de la señal con ruido, la diferencia entre ambas señales el la salida CDS, entre menor sea el tiempo transcurrido entre los muestreos más eficiente será la eliminación del ruido 1/f. El ruido remanente puede ser eliminado digitalmente con un procesamiento estadístico.

La conversión analógica digital CAD puede ser interna o externa al microcontrolador y multiplexarse para cada una de los 19 actuadores ( $P_1, P_2, \dots, P_{19}$ ), las presiones de referencia o *set point* ( $SP_1, SP_2, \dots, SP_{19}$ ) son enviadas vía el puerto serie. Con estos datos se calcula el ERROR y la variación del  $\Delta$ ERROR para determinar el ciclo de trabajo de la señal modulada en ancho de pulso correspondiente a cada uno de los circuitos neumáticos.

<sup>21</sup> Correlated Double Sampling

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

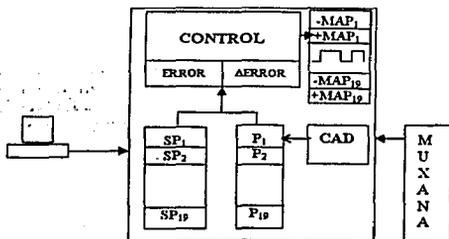


Figura 4.17 Versión Final

### Bibliografía y Referencias

- [1] Angulo, José M. et. al. "Microcontroladores pic : la solución en un chip" Parainfo. Madrid, 1997.
- [2] Boylestad, R. et. al. "Electrónica: Teoría de Circuitos" 6ª edición Prentice-Hall. México 1997.
- [3] Diefenderfer, A. J. "Instrumentación Electrónica" 2ª edición. McGraw-Hill. México 1990.
- [4] Jacob, J. Michel "Industrial Control Electronics. Applications and Design" 1ª Edición. Prentice Hall, Estados Unidos, 1998
- [5] McMenamin, J. Michel "Linear Integrated Circuits: Operation and Applications" 1ª edición. Prentice Hall. Estados Unidos, 1985.
- [6] Lucas Novasensor "Applying the Technology of NovaSensor Products" Application note 2. SM0036 Rev. A. September 1996.
- [7] Microchip "PICmicro™ Mid-Range MCU Family Reference Manual" © 1997 Microchip Technology.
- [8] Pallás-Areny, R. et. al. "Sensors and signal conditioning" 1a. edición. John Wiley & Sons, inc. Estados Unidos 1991.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Conclusiones

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El sistema Multiplexor Amplificador Fluido MAF controla eficientemente las presiones en un conjunto de 19 actuadores neumáticos. El control de la presión en el sistema esta en el orden del 0.1%, limitado por la resolución del convertidor utilizado.

Uno de los elementos relevantes del sistema son las electroválvulas que se utilizaron en lugar de reguladores comerciales. Entre las ventajas de las electroválvulas se pueden señalar que su característica de funcionamiento es lineal, pueden utilizarse con diferentes fluidos, son de bajo costo y potencia de operación, se habilitan con solamente un bit, son de alta calidad y fáciles de intercambiar si es necesario.

El circuito neumático, implementado con dos electroválvulas acopladas simétricamente, no necesita un flujo permanente, únicamente funciona cuando hay que hacer una corrección en la cavidad, esto disminuye el consumo de potencia del sistema.

El ancho de banda del sistema esta alrededor de 1Hz, suficiente para aplicaciones activas (0.3Hz), no obstante será posible alcanzar velocidades mayores para aplicaciones adaptativas si en lugar de aire se utiliza un fluido incompresible de baja viscosidad.

La versión final del MAF deberá considerar el análisis adecuado de ruido, además de contar actuador con su correspondiente circuito neumático, también se esta trabajando en un algoritmo de control que considera el error del sistema así como la variación del mismo.

Una vez concluida será posible implementarse en el espejo flexible para llevar a cabo las pruebas ópticas y corroborar los resultados de la simulación. Aun cuando el MAF fue diseñado para aplicarse a los Espejos Flexibles tiene otras aplicaciones inmediatas, entre ellas podrá utilizarse para mejorar el sistema de suspensión activa del telescopio 2m, el cual cuenta con 18 actuadores neumáticos que soportan el espejo y corrigen aberraciones de bajo orden. Otra de las aplicaciones del MAF podría ser en el nuevo concepto de pulido por fluidos abrasivos que actualmente se desarrolla en el IAUNAM, para controlar la presión del fluido que entra a un conjunto de 19 toberas.

NO. 100  
100-100-100  
100-100-100  
100-100-100

## **Apndice A**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





# PIC16F87X

## 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

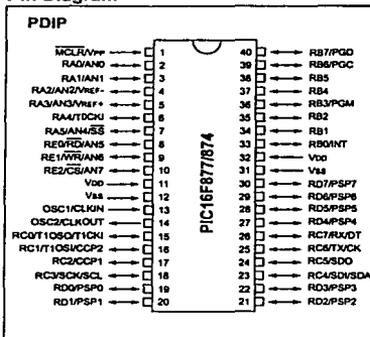
### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

### Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input  
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and  
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM  
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two  
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature  
ranges
- Low-power consumption:
  - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
  - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 1 µA typical standby current

### Pin Diagram

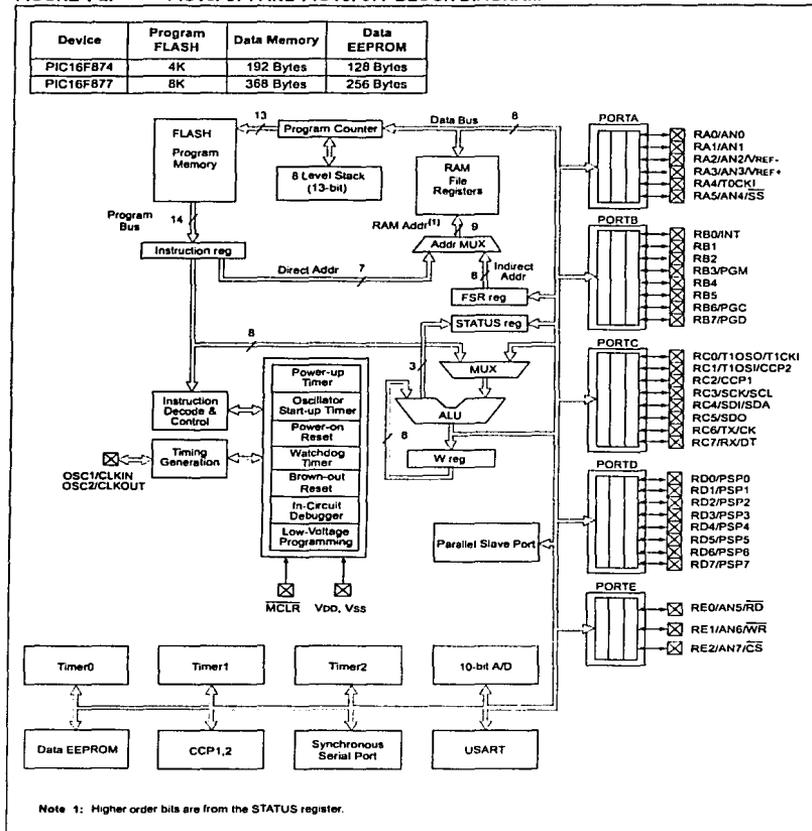


### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during SLEEP via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

# PIC16F87X

FIGURE 1-2: PIC16F874 AND PIC16F877 BLOCK DIAGRAM



## NPC-1210 Series

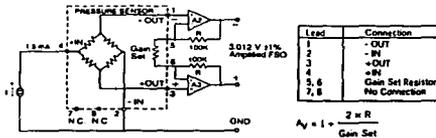
Solid State  
Pressure Sensor  
Low-Medium Pressure

The NPC-1210 series of solid state pressure sensors are designed to provide a cost effective solution for applications that require calibrated performance over a wide temperature range. Packaged in a dual-in-line configuration, the NPC-1210 series is intended for printed circuit board mounting. Optional pressure port and lead configurations give superior flexibility in low profile applications where pressure connection orientation is critical.

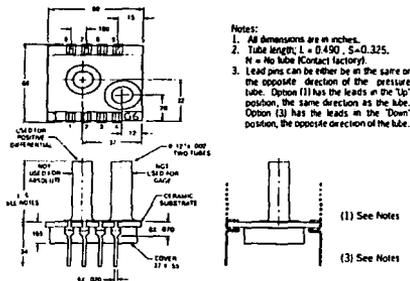
The NPC-1210 series is based on NovaSensor®'s advanced SenStable® piezoresistive sensing technology. Silicon micromachining techniques are used to ion implant piezoresistive strain gages into a Wheatstone bridge configuration. The NPC-1210 offers the added advantage of superior temperature performance over the temperature compensated range of 0°C to +60°C. A gain set resistor is included to normalize the FSO for field interchangeability. Additionally, the NPC-1210 series is available in pressure ranges from 0 to 5 through 0 to 100 psi. Please contact the factory for other pressure ranges.



### Schematic Diagram



### Package Diagram



### APPLICATIONS

- Industrial automation
- Air flow monitors
- Process control
- Liquid level
- Medical equipment
- Water measurement
- Underground cable leak detection

### FEATURES

- 100 mV Full-scale Output
- ±0.1% accuracy
- Interchangeable
- Temperature Compensated 0°C to 60°C
- PCB mountable package
- Media compatible
- DIP package
- Solid state reliability
- Individual device traceability

### PRESSURE RANGES

- Gauge and Differential  
5, 15, 30, 50 and 100 psi
- Absolute  
15, 30, 50 and 100 psi

73

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

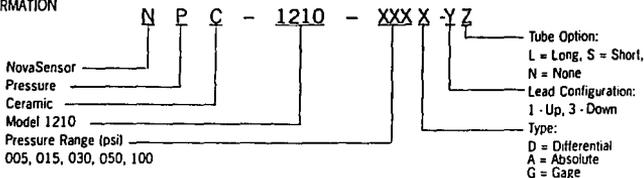
# NPC-1210 Sensor Specification

PARAMETER	VALUE	UNITS	NOTES		
<b>ENVIRONMENTAL</b>					
Temperature Operating	-40 to +125	°C	-40 to +257°F		
Compensated Storage	0 to +60	°C	+32 to +140°F		
Storage	-55 to +150	°C	-67 to +302°F		
<b>MECHANICAL</b>					
Weight	2.5	grams			
Media Compatibility:	Positive differential and gage ports Absolute, negative differential ports	Compatible with wetted materials Dry gases only	7		
<b>PERFORMANCE (Note 1)</b>					
Parameter	Units	Min.	Typ.	Max.	Notes
Full Scale Output (FSO)	mV	75	100	150	2, 3
Zero Pressure Output	±mV	—	—	2	3
Linearity	±%FSO	—	—	0.1	4, 8
Pressure Hysteresis	±%FSO	—	—	0.1	
Input Impedance	Ω	2500	4000	6000	
Output Impedance	Ω	4000	5000	6000	
Thermal Accuracy-Span	±%FSO	—	—	0.5	3, 5, 8
Thermal Accuracy-Zero	±%FSO	—	—	0.5	3, 5, 8
Temperature Coefficient-Resistance	%/°C	—	0.22	—	5
Thermal Hysteresis-Zero	±%FSO	—	0.1	—	5
Input Excitation	mA	—	1.5	2.0	
Pressure Overload	Rated	—	—	3X	6

**Notes:**

- Supply current = 1.5mA and ambient temperature = 25°C, unless otherwise noted.
- Output span of uncalibrated sensor.
- Compensation resistors are an integral part of the sensor package; no additional external resistors are required. Pins 7 and 8 must be kept open. The NPC-1210 is interchangeable only when used with the gain set resistor shown in the Schematic Diagram.
- Best fit straight line.
- Temperature range 0-60°C, reference to 25°C.
- 3X or 200 psi maximum, whichever is less.
- Wetted materials are pyrex, ceramic, silicon, epoxy, RTV and nickel.
- Call factory for 5 PSI spec.

## ORDERING INFORMATION



**Sales Terms:**

NovaSensor standard sales terms apply. Prices and specifications are subject to change without notice.

**Warranty:**

NovaSensor warrants its products against defects in material and workmanship for 12 months from date of shipment. Products not subjected to misuse will be repaired or replaced. THE FOREGOING IS IN LIEU OF ANY OTHER EXPRESSED OR IMPLIED WARRANTIES. NovaSensor reserves the right to make changes to any product herein and assumes no liability arising out of the application or use of any product or circuit described or referenced herein.



NOVASENSOR

105 Mission Court, Fremont, California 94539 Toll Free: 800 962-7364 Tel: 510 661 6000 Fax: 510 770 0645

5M003 Rev. A

74.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



# TEXAS INSTRUMENTS

Data sheet acquired from Harris Semiconductor  
SCH5052A - Revised March 2002

## CMOS Analog Multiplexers/Demultiplexers

High-Voltage Types (20-Volt Rating)

- CD4067B - Single 16-Channel Multiplexer/Demultiplexer
- CD4097B - Differential 8-Channel Multiplexer/Demultiplexer

■ **CD4067B and CD4097B CMOS analog multiplexers/demultiplexers\*** are digitally controlled analog switches having low ON impedance, low OFF leakage current, and internal address decoding. In addition, the ON resistance is relatively constant over the full input-signal range.

The CD4067B is a 16-channel multiplexer with four binary control inputs, A, B, C, D, and an inhibit input, arranged so that any combination of the inputs selects one switch. The CD4097B is a differential 8-channel multiplexer having three binary control inputs A, B, C, and an inhibit input. The inputs permit selection of one of eight pairs of switches.

A logic "1" present at the inhibit input turns all channels off.

The CD4067 and CD4097 are supplied in 14-lead dual-in-line welded-seal ceramic packages (D suffix), 24-lead dual-in-line frit-seal ceramic packages (F suffix), 24-lead dual-in-line plastic packages (E suffix), 24-lead small-outline package (NSR suffix), and in chip form (H suffix).

\*When these devices are used as demultiplexers, the channel in/out terminals are the outputs and the common out/in terminals are the inputs.

**Recommended Operating Conditions at TA = 25°C (Unless Otherwise Specified)**  
For maximum reliability, nominal operating conditions should be selected so that operation is always within the following range. Values shown apply to all types except as noted.

Characteristic	Min.	Max.	Units
Supply-Voltage Range (TA=Full Package-Temp. Range)	3	18	V
Multiplexer Switch Input Current Capability	-	25	mA
Output Load Resistance	100	-	Ω

### NOTE:

In certain applications, the external load-resistor current may include both VDD and signal-line components. To avoid drained VDD current when switch current flows into the transmission gate inputs, the voltage drop across the bidirectional switch must not exceed 0.8 volt (calculated from RDN values shown in ELECTRICAL CHARACTERISTICS CHART). No VDD current will flow through RL if the switch current flows into terminal 1 on the CD4067; terminals 1 and 17 on the CD4097.

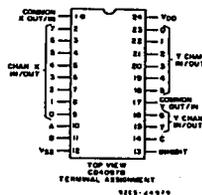
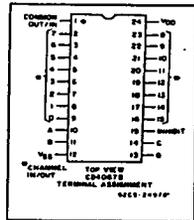
## CD4067B, CD4097B Types

### Features:

- Low ON resistance: 125 Ω (typ.) over 15 Vpp signal-input range for VDD-VSS=15 V
- High OFF resistance: channel leakage of ≤10 nA (typ.) @ VDD-VSS=10 V
- Matched switch characteristic: RON=5 Ω (typ.) for VDD-VSS=15 V
- Very low quiescent power dissipation under all digital-control input and supply conditions: 0.2 μW (typ.) @ VDD-VSS=10 V
- Binary address decoding on chip
- 5-V, 10-V, and 18-V parametric ratings
- 100% tested for quiescent current at 20 V
- Standardized symmetrical output characteristic
- Maximum input current of 1 μA at 18 V over full package temperature range: 100 nA at 18 V and 25°C
- Meets all requirements of JEDEC Testmethod Standard No. 13B, "Standard Specifications for Description of 'B' Series CMOS Devices"

### Applications:

- Analog and digital multiplexing and demultiplexing
- A/D and D/A conversion
- Signal gating



3  
COMMERCIAL CMOS  
HIGH VOLTAGE ICs

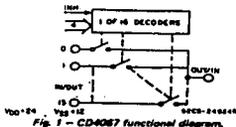


Fig. 1 - CD4067 functional diagram.

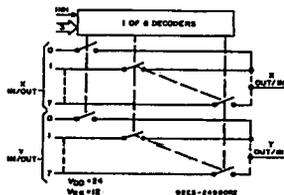


Fig. 2 - CD4097 functional diagram.

### CD4067 TRUTH TABLE

A	B	C	D	Inh	Selected Channel
X	X	X	X	1	None
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1
0	1	0	0	0	2
0	0	1	0	0	3
0	1	1	0	0	4
0	0	0	1	0	5
0	1	0	1	0	6
1	1	0	0	0	7
1	0	0	1	0	8
1	0	1	0	0	9
0	1	0	1	0	10
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	12
1	0	1	1	0	13
0	1	1	1	0	14
1	1	1	1	0	15

### CD4097 TRUTH TABLE

A	B	C	Inh	Selected Channel
X	X	0	1	None
0	0	0	0	0X, 0Y
1	0	0	0	1X, 1Y
0	1	0	0	2X, 2Y
1	1	0	0	3X, 3Y
0	0	1	0	4X, 4Y
1	0	1	0	5X, 5Y
0	1	1	0	6X, 6Y
1	1	1	0	7X, 7Y

75  
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# CD4067B, CD4097B Types

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

CHARACTERISTIC	CONDITIONS			LIMITS AT INDICATED TEMPERATURES (°C)						Units
	V <sub>ih</sub> (V)	V <sub>ss</sub> (V)	V <sub>DD</sub> (V)	-55	-40	+85	+125	+25		
								Min.	Typ.	
<b>SIGNAL INPUTS (V<sub>ih</sub>) AND OUTPUTS (V<sub>oh</sub>)</b>										
Quiescent Device Current, I <sub>DD</sub> Max.			5	5	5	150	150	--	0.04	5
			10	10	10	300	300	--	0.04	10
ON-state Resistance V <sub>SS</sub> < V <sub>ih</sub> < V <sub>DD</sub> I <sub>on</sub> Max.			20	20	20	600	600	--	0.04	20
			20	100	100	3000	3000	--	0.08	100
Change in on-state Resistance (Between Any Two Channels) Δr <sub>on</sub>		0	5	800	850	1200	1300	--	470	1050
		0	10	310	330	520	550	--	180	400
		0	15	200	210	300	320	--	125	240
Off-Channel Leakage Current, Any Channel OFF Max. or All Channels OFF (Common OUT/IN) Max.		0	5	--	--	--	--	--	15	--
		0	10	--	--	--	--	--	10	--
		0	15	--	--	--	--	--	5	--
Capacitance: Input, C <sub>i</sub> Output, C <sub>o</sub> CD4067 CD4097 Feed-through, C <sub>tot</sub>		-5	5	--	--	--	--	--	55	--
									35	
Propagation Delay Time (Signal Input to Output)	V <sub>DD</sub>	R <sub>L</sub> = 200 KΩ C <sub>L</sub> = 50 pF t <sub>r</sub> , t <sub>f</sub> = 20 ns	5	--	--	--	--	--	30	60
			10	--	--	--	--	--	15	30
			15	--	--	--	--	--	10	20
<b>CONTROL (ADDRESS or INHIBIT) V<sub>c</sub></b>										
Input Low Voltage, V <sub>IL</sub> Max. Input High Voltage, V <sub>IH</sub> Min.	-V <sub>DD</sub> thru 1 KΩ	R <sub>L</sub> = 1 KΩ to V <sub>SS</sub> I <sub>is</sub> = 2 μA on all OFF Channels	5	1.5	--	--	--	--	1.5	
			10	3	--	--	--	--	3	
			15	4	--	--	--	--	4	
			5	3.5	3.5	--	--	--	3.5	
			10	7	7	--	--	--	7	
			15	11	11	--	--	--		

\* Determined by minimum feasible leakage measurement for automatic testing.

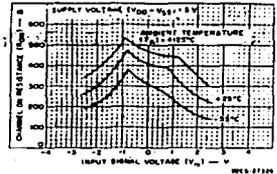


Fig. 3—Typical ON resistance vs. input signal voltage (all types).

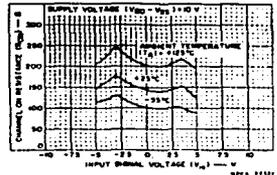


Fig. 4—Typical ON resistance vs. input signal voltage (all types).

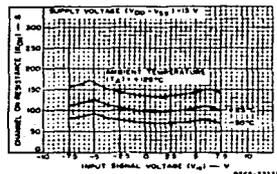


Fig. 5—Typical ON resistance vs. input signal voltage (all types).

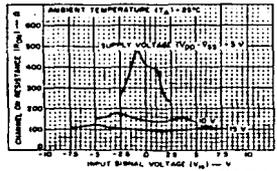


Fig. 6—Typical ON resistance vs. input signal voltage (all types).

76

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

**TL071, TL071A, TL071B, TL072**  
**TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B**  
**LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS**  
SLOS080D - SEPTEMBER 1978 - REVISED AUGUST 1996

- Low Power Consumption
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias and Offset Currents
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion  
0.003% Typ
- Low Noise  
 $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  Typ at  $f = 1 \text{ kHz}$
- High Input Impedance . . . JFET Input Stage
- Internal Frequency Compensation
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate . . .  $13 \text{ V}/\mu\text{s}$  Typ
- Common-Mode Input Voltage Range  
Includes  $V_{CC+}$

**description**

The JFET-input operational amplifiers in the TL07\_ series are designed as low-noise versions of the TL08\_ series amplifiers with low input bias and offset currents and fast slew rate. The low harmonic distortion and low noise make the TL07\_ series ideally suited for high-fidelity and audio preamplifier applications. Each amplifier features JFET inputs (for high input impedance) coupled with bipolar output stages integrated on a single monolithic chip.

The C-suffix devices are characterized for operation from 0°C to 70°C. The I-suffix devices are characterized for operation from -40°C to 85°C. The M-suffix devices are characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C.

**AVAILABLE OPTIONS**

T <sub>A</sub>	V <sub>IO</sub> max AT 25°C	PACKAGE							
		SMALL OUTLINE (DJ)†	CHIP CARRIER (FK)	CERAMIC DIP (J)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (N)	PLASTIC DIP (P)	TSSOP PACKAGE (PW)	FLAT PACKAGE (W)
0°C to 70°C	10 mV	TL071CD	—	—	—	—	TL071CP	TL071CPWLE	—
	6 mV	TL071ACD	—	—	—	—	TL071ACP	—	—
	3 mV	TL071BCD	—	—	—	—	TL071BCP	—	—
0°C to 70°C	10 mV	TL072CD	—	—	—	—	TL072CP	TL072CPWLE	—
	6 mV	TL072ACD	—	—	—	—	TL072ACP	—	—
	3 mV	TL072BCD	—	—	—	—	TL072BCP	—	—
0°C to 70°C	10 mV	TL074CD	—	—	—	TL074CN	—	TL074CPWLE	—
	6 mV	TL074ACD	—	—	—	TL074ACN	—	—	—
	3 mV	TL074BCD	—	—	—	TL074BCN	—	—	—
-40°C to 85°C	6 mV	TL071ID	—	—	—	—	TL071IP	—	—
		TL072ID TL074ID	—	—	—	TL074IN	TL072IP	—	—
-55°C to 125°C	6 mV	—	TL071MFK	—	TL071MJG	—	—	—	—
	6 mV	—	TL072MFK	—	TL072MJG	—	TL072MP	—	—
	9 mV	—	TL074MFK	TL074MJ	—	TL074MN	—	—	TL074MW

† The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (e.g., TL071CDR). The PW package is only available left-ended taped and reeled (e.g., TL072CPWLE).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the latest of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1996, Texas Instruments Incorporated

**TL071, TL072, TL071B, TL072**  
**TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B**  
**LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS**  
SL05080D - SEPTEMBER 1978 - REVISED AUGUST 1996

electrical characteristics,  $V_{CC\pm} = \pm 15$  V (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	$T_A$ ‡	TL071M TL072M		TL074M		UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	
$V_{IO}$ Input offset voltage	$V_O = 0$ , $R_S = 50 \Omega$	25°C	3	6	3	6	mV
		Full range	9		15		
$\alpha V_{IO}$ Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0$ , $R_S = 50 \Omega$	Full range	18		18		$\mu V/^\circ C$
		25°C	5	100	5	100	pA
$I_{IO}$ Input offset current	$V_O = 0$	Full range	20		20		
		25°C	65	200	65	200	pA
$I_{IB}$ Input bias current‡	$V_O = 0$	25°C	50		50		nA
		25°C	$\pm 11$	-12 to 15	$\pm 11$	-12 to 15	V
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	25°C	$\pm 12$	$\pm 13.5$	$\pm 12$	$\pm 13.5$	V
		Full range	$\pm 12$		$\pm 12$		
$V_{OM}$ Maximum peak output voltage swing	$R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$	Full range	$\pm 10$		$\pm 10$		V
	$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$		$\pm 10$		$\pm 10$		
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10$ V, $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	25°C	35	200	35	200	V/mV
			15		15		
$B_1$ Unity-gain bandwidth	$T_A = 25^\circ C$		3		3		MHz
$r_i$ Input resistance	$T_A = 25^\circ C$		10 <sup>12</sup>		10 <sup>12</sup>		$\Omega$
$CMRR$ Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$ , $V_O = 0$ , $R_S = 50 \Omega$	25°C	80	86	80	86	dB
$k_{SVR}$ Supply-voltage rejection ratio ( $\Delta V_{CC\pm} / \Delta V_{IO}$ )	$V_{CC} = \pm 9$ V to $\pm 15$ V, $V_O = 0$ , $R_S = 50 \Omega$	25°C	80	86	80	86	dB
$I_{CC}$ Supply current (each amplifier)	$V_O = 0$ , No load	25°C	1.4	2.5	1.4	2.5	mA
$V_{O1}/V_{O2}$ Crosstalk attenuation	$A_{VD} = 100$	25°C	120		120		dB

† Input bias currents of a FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive as shown in Figure 4. Pulse techniques must be used that will maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.

‡ All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode voltage unless otherwise specified. Full range is  $T_A = -55^\circ C$  to  $125^\circ C$ .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources

### General Description

The LM134/LM234/LM334 are 3-terminal adjustable current sources featuring 10,000:1 range in operating current, excellent current regulation and a wide dynamic voltage range of 1V to 40V. Current is established with one external resistor and no other parts are required. Initial current accuracy is  $\pm 3\%$ . The LM134/LM234/LM334 are true floating current sources with no separate power supply connections. In addition, reverse applied voltages of up to 20V will draw only a few dozen microamperes of current, allowing the devices to act as both a rectifier and current source in AC applications.

The sense voltage used to establish operating current in the LM134 is 64mV at 25°C and is directly proportional to absolute temperature (°K). The simplest one external resistor connection, then, generates a current with  $\approx +0.33\%/^{\circ}\text{C}$  temperature dependence. Zero drift operation can be obtained by adding one extra resistor and a diode.

Applications for the current sources include bias networks, surge protection, low power reference, ramp generation,

LED driver, and temperature sensing. The LM234-3 and LM234-6 are specified as true temperature sensors with guaranteed initial accuracy of  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 6^{\circ}\text{C}$ , respectively. These devices are ideal in remote sense applications because series resistance in long wire runs does not affect accuracy. In addition, only 2 wires are required.

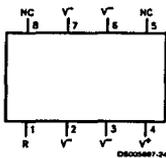
The LM134 is guaranteed over a temperature range of  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$ , the LM234 from  $-25^{\circ}\text{C}$  to  $+100^{\circ}\text{C}$  and the LM334 from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$ . These devices are available in TO-46 hermetic, TO-92 and SO-8 plastic packages.

### Features

- Operates from 1V to 40V
- 0.02%/V current regulation
- Programmable from 1 $\mu\text{A}$  to 10mA
- True 2-terminal operation
- Available as fully specified temperature sensor
- $\pm 3\%$  initial accuracy

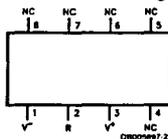
### Connection Diagrams

SO-8  
Surface Mount Package



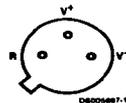
Order Number LM334M or LM334MX  
See NS Package Number M08A

SO-8 Alternative Pinout  
Surface Mount Package



Order Number LM334SM or LM334SMX  
See NS Package Number M08A

TO-46  
Metal Can Package



V<sup>-</sup> Pin is electrically connected to case.

Bottom View  
Order Number LM134H,  
LM234H or LM334H  
See NS Package  
Number H03H

TO-92 Plastic Package



Bottom View  
Order Number LM334Z, LM234Z-3 or LM234Z-6  
See NS Package Number Z03A

**Absolute Maximum Ratings (Note 1)**

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

V <sup>+</sup> to V <sup>-</sup> Forward Voltage	
LM134/LM234/LM334	40V
LM234-3/LM234-6	30V
V <sup>+</sup> to V <sup>-</sup> Reverse Voltage	20V
R Pin to V <sup>-</sup> Voltage	5V
Set Current	10 mA
Power Dissipation	400 mW
ESD Susceptibility (Note 6)	2000V
Operating Temperature Range (Note 5)	
LM134	-55°C to +125°C

LM234/LM234-3/LM234-6

-25°C to +100°C

LM334

0°C to +70°C

**Soldering Information**

TO-92 Package (10 sec.)	260°C
TO-46 Package (10 sec.)	300°C
SO Package	
Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Infrared (15 sec.)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" (Appendix D) for other methods of soldering surface mount devices.

**Electrical Characteristics (Note 2)**

Parameter	Conditions	LM134/LM234			LM334			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Set Current Error, V <sup>+</sup> =2.5V, (Note 3)	10µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 1mA			3			6	%
	1mA < I <sub>SET</sub> ≤ 5mA			5			8	%
	2µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 10µA			8			12	%
Ratio of Set Current to Bias Current	100µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 1mA	14	18	23	14	18	26	
	1mA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 5mA		14			14		
	2µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 100µA		18	23		18	26	
Minimum Operating Voltage	2µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 100µA		0.8			0.8		V
	100µA < I <sub>SET</sub> ≤ 1mA		0.9			0.9		V
	1mA < I <sub>SET</sub> ≤ 5mA		1.0			1.0		V
Average Change in Set Current with Input Voltage	2µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 1mA							
	1.5 ≤ V <sup>+</sup> ≤ 5V		0.02	0.05		0.02	0.1	%/V
	5V ≤ V <sup>+</sup> ≤ 40V		0.01	0.03		0.01	0.05	%/V
	1mA < I <sub>SET</sub> ≤ 5mA							
	1.5V ≤ V ≤ 5V		0.03			0.03		%/V
5V ≤ V ≤ 40V		0.02			0.02		%/V	
Temperature Dependence of Set Current (Note 4)	25µA ≤ I <sub>SET</sub> ≤ 1mA	0.96T	T	1.04T	0.96T	T	1.04T	
Effective Shunt Capacitance			15			15		pF

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

Note 2: Unless otherwise specified, tests are performed at T<sub>J</sub> = 25°C with pulse testing so that junction temperature does not change during test.

Note 3: Set current is the current flowing into the V<sup>+</sup> pin. For the Basic 2-Terminal Current Source circuit shown on the first page of this data sheet, I<sub>SET</sub> is determined by the following formula: I<sub>SET</sub> = 67.7 mV/R<sub>SET</sub> (± 25°C). Set current error is expressed as a percent deviation from this amount. I<sub>SET</sub> increases at 0.336%/°C @ T<sub>J</sub> = 25°C (227 µV/°C).

Note 4: I<sub>SET</sub> is directly proportional to absolute temperature (°K). I<sub>SET</sub> at any temperature can be calculated from: I<sub>SET</sub> = I<sub>0</sub> (T/T<sub>0</sub>) where I<sub>0</sub> is I<sub>SET</sub> measured at T<sub>0</sub> (°K).

Note 5: For elevated temperature operation, T<sub>J</sub> max is:

LM134	150°C
LM234	125°C
LM334	100°C

Thermal Resistance	TO-92	TO-46	SO-8
θ <sub>JA</sub> (Junction to Ambient)	180°C/W (0.4" leads) 160°C/W (0.125" leads)	440°C/W	165°C/W
θ <sub>JC</sub> (Junction to Case)	N/A	32°C/W	80°C/W

Note 6: Human body model, 100pF discharged through a 1.5kΩ resistor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**ON Semiconductor®**

## Plastic Medium-Power Complementary Silicon Transistors

... designed for general-purpose amplifier and low-speed switching applications.

- High DC Current Gain —  
 $h_{FE} = 2500$  (Typ) @  $I_C$   
 $= 4.0$  Adc
- Collector-Emitter Sustaining Voltage — @ 100 mA dc  
 $V_{CE(sus)} = 60$  Vdc (Min) — TIP120, TIP125  
 $= 80$  Vdc (Min) — TIP121, TIP126  
 $= 100$  Vdc (Min) — TIP122, TIP127
- Low Collector-Emitter Saturation Voltage —  
 $V_{CE(sat)} = 2.0$  Vdc (Max) @  $I_C = 3.0$  Adc  
 $= 4.0$  Vdc (Max) @  $I_C = 5.0$  Adc
- Monolithic Construction with Built-In Base-Emitter Shunt Resistors
- TO-220AB Compact Package

### \*MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TIP120, TIP125	TIP121, TIP126	TIP122, TIP127	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE}$	60	80	100	Vdc
Collector-Base Voltage	$V_{CB}$	60	80	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	5.0			Vdc
Collector Current — Continuous Peak	$I_C$	5.0 8.0			A dc
Base Current	$I_B$	120			mA dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	65 0.52			Watts W/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	2.0 0.016			Watts W/ $^\circ\text{C}$
Unclamped Inductive Load Energy (1)	$E$	50			mJ
Operating and Storage Junction, Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-85 to +150			$^\circ\text{C}$

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.92	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	62.5	$^\circ\text{C/W}$

(1)  $I_C = 1$  A,  $L = 100$  mH, P.R.F. = 10 Hz,  $V_{CC} = 20$  V,  $R_{BE} = 100 \Omega$

**NPN**  
**TIP120\***  
**TIP121\***  
**TIP122\***  
**PNP**  
**TIP125\***  
**TIP126\***  
**TIP127\***

\*ON Semiconductor Preferred Device

**DARLINGTON**  
**5 AMPERE**  
**COMPLEMENTARY SILICON**  
**POWER TRANSISTORS**  
**60-80-100 VOLTS**  
**65 WATTS**



Preferred devices are ON Semiconductor recommended choices for future use and best overall value.

## TIP120 TIP121 TIP122 TIP125 TIP126 TIP127

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Collector-Emitter Sustaining Voltage (1) ( $I_C = 100\text{ mAdc}$ , $I_B = 0$ )	TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127	$V_{CE0}(\text{sus})$	60 80 100	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 30\text{ Vdc}$ , $I_B = 0$ ) ( $V_{CE} = 40\text{ Vdc}$ , $I_B = 0$ ) ( $V_{CE} = 50\text{ Vdc}$ , $I_B = 0$ )	TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127	$I_{CEO}$	— — —	mAdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = 60\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ ) ( $V_{CB} = 80\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ ) ( $V_{CB} = 100\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ )	TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127	$I_{CBO}$	— — —	mAdc
Emitter Cutoff Current ( $V_{BE} = 5.0\text{ Vdc}$ , $I_C = 0$ )		$I_{EBO}$	—	mAdc
<b>ON CHARACTERISTICS (1)</b>				
DC Current Gain ( $I_C = 0.5\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 3.0\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$ )		$h_{FE}$	1000 1000	—
Collector-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 3.0\text{ Adc}$ , $I_B = 12\text{ mAdc}$ ) ( $I_C = 5.0\text{ Adc}$ , $I_B = 20\text{ mAdc}$ )		$V_{CE}(\text{sat})$	— —	Vdc
Base-Emitter On Voltage ( $I_C = 3.0\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$ )		$V_{BE}(\text{on})$	—	Vdc
<b>DYNAMIC CHARACTERISTICS</b>				
Small-Signal Current Gain ( $I_C = 3.0\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$ , $f = 1.0\text{ MHz}$ )		$h_{fe}$	4.0	—
Output Capacitance ( $V_{CB} = 10\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ , $f = 0.1\text{ MHz}$ )	TIP125, TIP126, TIP127 TIP120, TIP121, TIP122	$C_{ob}$	— —	pF

(1) Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300\ \mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .

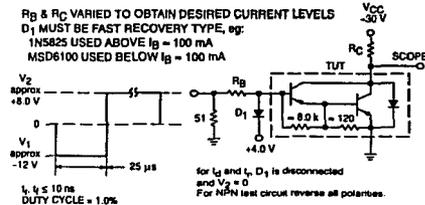


Figure 2. Switching Times Test Circuit

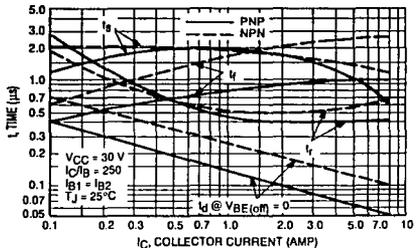


Figure 3. Switching Times

## Apéndice B

Listado del programa de aplicación del PIC:

```

list p = PIC16F877
include <pl6f877.inc>,"c:\archiv-1\mplab\pl6f877"
;.....VARIABLES
PRH equ 0x21
PRH equ 0x22
PRL equ 0x23
PNL equ 0x24
ERRORL equ 0x25
ERRORH equ 0x26
Signal equ 0x27
SignalH equ 0x28
SignalL equ 0x29
_ERRORL equ 0x2a
_ERRORH equ 0x2b
SEL_INJ equ 0x2c

org 0x00
goto START

START
banksel PORTA

;.....limpia puertos
movlw B'10110001' ; ch1 3-5b enciende el convertidor bo
movwf ADCON0 ;10xxxxxx 32*toac
banksel TRISA

movlw B'10000000' ;
movwf OPTION_REG ;

movlw 0xff ;
movwf TRISA ;
movlw 0x07 ;
movwf TRISE ;
clrf TRISB ;
clrf TRISC ;

movlw B'10000000' ;
movwf ADCON1 ;
banksel PORTA

movlw b'00010000' ;
movwf PORTB ;
clrf PORTC ;
clrf PORTD ;
call LOAD_INJ

NEXT
movlw b'00010000' ; apaga las valvulas
movwf PORTB ;
call INJECTOR

LEE
bsf ADCON0, ADON ;
call DLY_2TAD ;

bsf ADCON0, 3 ;,ch7 PD
call ADQ ;
movf ADRESH, W ;

```

1970 21217

```

movwf PRH

banksel TRISA
movf ADRESL, W
banksel PORTA
movwf PRL

bsf ADCON0, ADON
call DLY_2TAD

bcf ADCON0, 3 ;ch6 PN
call ADQ
movf ADRESH, W
movwf PNH

banksel TRISA
movf ADRESL, W
banksel PORTA
movwf PRL

```

.....CALCULO DEL ERROR

```

movf PNL, W
subwf PRL, W
movwf ERRORL
movf STATUS, W
andlw 0x05
movwf SignoL
btfss SignoL, 0
goto ACARREO
ACARREO
goto RestH

RestH
incf PNH, F
bsf SignoL, 1

RestH
movf PNH, W
subwf PRH, W
movwf ERRORH
movf STATUS, W
andlw 0x05
movwf SignoH

```

.....SIGNO DEL ERROR

```

SIGNO
btfsc SignoH, 2
goto CHK_L

btfss SignoH, 0
goto PULL
goto PUSH

CHK_L
btfsc SignoL, 1
goto PUSH
btfsc SignoL, 2
goto NEXT

btfss SignoL, 0
goto PULL
goto PUSH

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

;001 pos +Pss PUSH

.....MODULACION ANCHO DE PULSO

```

PULL
clrw
comf ERRORL, F
incf ERRORL
btfac STATUS, Z
addlw 0x01

```

# TESIS CON FALLA DE CARGEN

```

comf   ERRORH, F
addwf  ERRORH, F

movlw  0x03
andwf  ERRORH, F

call   PWMpull
goto   LEE

PUSH
call   PWMpush
goto   LEE
;.....

PWMpush
call   OFFSET;

bcf    PORTB, 7

movf   ERRORH, F
btfss  STATUS, Z           ; si no es cero
goto   sigue_push
goto   unavez_push

sigue_push
call   PWM_ON
decfsz ERRORH, F
goto   sigue_push

unavez_push
call   PWM_ON
bcf    PORTB, 7
movf   _ERRORH, F
btfss  STATUS, Z
goto   _sigue_push
goto   _unavez_push

_sigue_push
call   PWM_OFF
decfsz _ERRORH
goto   _sigue_push

_unavez_push
call   PWM_OFF
return

;.....

PWMpull
call   OFFSET;
bcf    PORTB, 6
movf   ERRORH, F
btfss  STATUS, Z           ; si no es cero
goto   sigue_pull
goto   unavez_pull       ; solo checa error1

sigue_pull
call   PWM_ON
decfsz ERRORH, F
goto   sigue_pull

unavez_pull
call   PWM_ON
bcf    PORTB, 6
movf   _ERRORH, F
btfss  STATUS, Z

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

```

goto _sigue_pull
goto _unavez_pull

_sigue_pull
call PWM_OFF
decfsz _ERRORH, F
goto _sigue_pull

_unavez_pull
call PWM_OFF
return

```

;

**PWM\_OFF**

```

_loop
call DLYFREC
decfsz _ERRORL, F
goto _loop
return

```

; para obtener la frecuencia deseada

**PWM\_ON**

```

loop
call DLYFREC
decfsz _ERRORL, F
goto loop
return

```

;

**DLY\_2TAD**

```

movlw 0x64 ;100d PARA 20M, FB
movwf TMRO

```

**ESPERA**

```

btfss INTCON, TOIF
goto ESPERA
bcf INTCON, TOIF
return

```

**ADQ**

```

movlw 0x32 ;f8, 50d 20M,
movwf TMRO

```

**LOOP**

```

btfss INTCON, TOIF
goto LOOP
bcf INTCON, TOIF
bsf ADCON0, GO

```

**WAIT**

```

btfsc ADCON0, GO
goto WAIT
return

```

;

**LOAD\_INJ**

```

movlw d'20'
movwf SEL_INJ
return

```

**INJECTOR**

```

decfsz SEL_INJ, F
goto WRITMUX

clr! PORTC
call LOAD_INJ
return

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

```

WRTMUX
    movl   SEL_INJ, W
    movwf  PORTC
    return
;-----
DLYFPREC
    movlw  0x0c
    movwf  retardo
otr
    decfz  retardo
    goto  otr
    return
;.....*OFFSET PULSO MINIMO PARA ABRIR LA VALVULA
OFFSET
    movlw  0x12
    addwf  ERRORL, F
    btfsc  STATUS, C
    incf  ERRORH, F

    movlw  0x11
    movwf  _ERRORL
    movlw  0x04
    movwf  _ERRORH

    movl  ERRORL, W
    subwf  _ERRORL, F

    movl  ERRORH, W
    btfsc  STATUS, C           ; SI C=0,
    incf  ERRORH, W
    subwf  _ERRORH, F

    movl  _ERRORL, F         ; si _errorl es cero
    btfsc  STATUS, Z
    incf  _ERRORL, F

    return

```

en