

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

**DISEÑO ELECTRÓNICO PARA EL CONTROL DE UN
SISTEMA DE SOPORTE ACTIVO PARA UN ESPEJO
PRIMARIO DEFORMABLE**

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTA

CARLOS DESIDERIO CARRASCO LARA

Aprobador por



DR. LUIS SALAS CASALES
Presidente del Jurado



DR. RAUL MICHEL MURILLO
Secretario



DR. DAVID SALOMÉ HIRIART GARCÍA
Primer Vocal

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas aquellas personas que estuvieron conmigo en los momentos difíciles, a mi esposa Lucía, a mi pequeño hijo Carlos Yáir, a mis padres Desiderio y Eluvina, sin su apoyo no hubiese logrado nada.

A mi mentor Luis Salas Casales que me ha apoyado en todo momento en las decisiones académicas, tus consejos y tu amable disposición en todo momento me han sido de gran ayuda, además de haber depositado en mí toda tu confianza en el desarrollo de este proyecto y otros más. Gracias por creer en mí.

A los amigos de la carrera, Mauricio Carrillo, Miguel Sabido, Alfonso Paredes, Julio López, David Frez, Eri Mena.

En la Universidad, a Blanquita, Irma, Jesús Lerma, Fernando y a todas aquellas personas y maestros que estuvieron a mi alcance y disposición en el transcurso de mi carrera y que fueron de gran apoyo en mi desarrollo académico.

A mis maestros Luis Salas, Mario Farías, Leonel Cota, Luis Aguilar, Armando Reyes, Gloria Rubí, Mauricio Reyes, Leonel Gutiérrez y Roberto Vázquez.

También para los mecánicos de precisión del IAUNAM-Ensenada: Jorge Valdez (Pocho), que siempre ha sido un muy buen amigo y compañero; Benjamín García y Antolín Cordova, que siempre han estado dispuestos a darle la mano a la gente que los necesita.

A los astrónomos Alberto López, Mauricio Reyes, Rafael Costero, Julieta Fierro y algunos otros cuyo nombre se me escapa en estos momentos.

A mis mentores que cuando llegue al Observatorio en 1985 me trataron como a uno más del equipo: David Hiriart un muy buen amigo, le agradezco todos los consejos que me ha dado a través de los años; Raul Michel que todavía me tocó conocer de estudiante de licenciatura; Eugenio Ledezma gracias por apoyarme desde el principio; Víctor Arevalo y Raul Rico, gracias por enseñarme tantas cosas que aún me siguen siendo útiles.

Agradezco a todas las personas que, aunque no me acuerdo en este momento de sus nombres, han sido parte importante de mi desarrollo profesional.

RESUMEN

Este trabajo presenta la circuitería y la primera versión de la programación necesarias para el control del soporte activo del espejo primario del telescopio de 2.12m del Observatorio Astronómico Nacional situado en la Sierra de San Pedro Mártir en el municipio de Ensenada B.C., México. Para realizar el control de lazo cerrado dicho sistema utiliza una computadora PC-486, y tres tarjetas electrónicas: una realiza la lectura de los sensores de presión y peso en distintos puntos del espejo; otra actúa de interfaz entre la computadora y los motores de pasos; y una última tarjeta se encarga de las comunicaciones entre las anteriores tarjetas y la computadora. Se hizo también una primera versión del programa para el manejo de las tarjetas. Para lograr el soporte activo, el espejo primario se soportó con 18 actuadores neumáticos y tres celdas de carga por medio de los cuales se introdujeron deformaciones para modificar las características ópticas de la superficie del espejo. De esta manera el ajuste activo del soporte del espejo permite corregir las aberraciones ópticas intrínsecas y las producidas por las deformaciones por la gravedad al cambiar de posición. La calidad de la imagen del telescopio de 2.12m se mejoró de tal forma que el 80% de la radiación de una estrella que estaba contenida en el plano focal en una región con un diámetro de 1.8 segundos de arco, pasó a estar contenida en una región con un diámetro de 1.0 segundos de arco con una precisión de control del 1%.

INDICE

1	Introducción	7
2	Deformaciones en membranas elásticas	10
	2.1 Ley de Hooke en una dimensión	11
	2.2 Deformación de una viga	12
	2.3 Deformación de una placa circular	16
3	Calidad de imagen óptica	20
	3.1 Imagen puntual al limite de difracción	21
	3.2 La apertura Circular	25
	3.3 Aberraciones y Polinomios de Zernike	28
4	Soporte del espejo primario	35
	4.1 Número de Actuadores	36
	4.2 Calidad de Imagen Obtenida	39
	4.3 Puntos Duros	44
	4.4 Variaciones de Soporte con la Inclinación	46

5	Circuitos Electrónicos de Control	48
5.1	Descripción a Bloques de la Electrónica	48
5.1.1	Lazo de Control de Presión	49
5.1.2	Lazo de Posición	51
5.2	Circuitos Electrónico de Control	52
5.2.1	Sensores de Presión	52
5.2.2	Celdas de Carga	55
5.2.3	Inclinómetro	57
5.2.4	Tarjeta Analógica a Digital	58
5.2.5	Reguladores de Presión	62
5.2.6	El Ducto de Datos	64
6	Instalación en el Telescopio y Resultados	69
	Referencias	75
	Apéndices	77

1. Introducción.

El espejo primario del telescopio de 2.12m del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (De la Herrán 1981) fue hecho por Owens Illinois en la década de los años sesenta, usando un bloque de Cervite como material base. Fue pulido por Norman Cole en 1976 con una relación focal de 2.27. El espejo estaba soportado en su celda metálica por tres bolsas de aire con presiones controladas neumáticamente por un regulador gravitacional cosenoidal (hecho por la compañía Boller & Chivens), y un soporte lateral formado por un cinturón de plástico relleno con mercurio.

La calidad de imagen (Wilson et al. 1987) obtenida fue aceptable durante algunos años. Hasta la puesta en marcha de los detectores de estado sólido bidimensionales el astigmatismo fue identificado como la mayor aberración óptica con un valor medio cuadrático, rms, de 0.5 micras produciendo imágenes de fuentes puntuales con un diámetro del orden de 1.8 segundos de arco.

Con el desarrollo de la óptica activa, que ya ha sido incorporada en la gran mayoría de los telescopios de nueva tecnología, ha quedado demostrado que la eficiencia de un telescopio es proporcional al cuadrado de la calidad de su imagen. Esto implica, por ejemplo, que un telescopio de 2m con una imagen de una fuente puntual de 1.5 segundos de arco es nueve veces menos eficiente que uno del mismo diámetro con una imagen de 0.5 segundos de arco.

Este tipo de factores se ha comprobado, por ejemplo, al comparar el funcionamiento del antiguo telescopio de 3.6m de la ESO (European South Observatory) y el NTT (New Technology Telescope) (Willson et al. 1987) cuando el concepto de la óptica activa vió la luz por primera vez en 1989.

Durante 1993 y 1994 se realizaron varias pruebas en el telescopio de 2.12m, tendientes a determinar la causa primordial de su pobre calidad de imagen (Cordero et al., 1995). Después de probar y desarrollar diversos métodos, se llegó a la conclusión de que el problema principal era debido a aberraciones ópticas de bajo orden (segundo y tercer orden), esto es, fundamentalmente astigmatismo y coma. Estas aberraciones se consideraron corregibles mediante la implementación de un soporte activo para el espejo primario y una colimación adecuada del secundario. El soporte activo permitiría, además, compensar las deformaciones en el espejo producidas por su propio peso al cambiar éste su posición.

Con el método de Roddier (1994), que prueba el frente de onda en toda la superficie, fue posible determinar que las aberraciones de orden superior (esfericidad) y aberraciones de órdenes mayores debidas al mal pulido del espejo primario tienen una contribución pequeña en la aberración total. Por esta razón se concluyó que no sería necesario volver a pulir el espejo primario, sino que con deformarlo activamente sería posible corregir la mayor parte de sus aberraciones.

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo del sistema de control activo de la suspensión del espejo primario del telescopio de 2.12m del Observatorio Astronómico Nacional cuyo objetivo es mejorar la calidad de imagen. En el Capítulo 2 se presenta una introducción a la teoría de deformaciones elásticas haciendo énfasis particular en el caso de una membrana circular. En el Capítulo 3 se introducen los conceptos de calidad de imagen de un telescopio y cómo mejorar ésta a través de deformaciones del espejo primario. En el Capítulo 4 se describe el soporte del espejo. En el Capítulo 5 se presentan los circuitos electrónicos para controlar los sensores de presión, las celdas de carga y el inclinómetro, así como la interfaz a la computadora. En el Capítulo 6 se muestra cómo se instaló el sistema y los resultados obtenidos.

2. Deformaciones en membranas elásticas.

Para tratar el problema particular de las deformaciones en un espejo primario, como es el caso del telescopio de 2.12m, es conveniente abordar el problema desde un punto de vista unidimensional para luego explorar la solución en dos dimensiones en donde se considerará el modelo de una membrana elástica circular soportada por un anillo concéntrico.

2.1 Ley de Hooke en una dimensión.

Un espejo primario, al igual que cualquier otro sólido, tiene un intervalo lineal de deformaciones en respuesta a esfuerzos aplicados. Esta relación entre esfuerzo y deformación está dada por la ley de Hooke: El esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria y en una dimensión esta dada por

$$\sigma = E\delta, \quad (2.1)$$

donde σ es el esfuerzo o tensión, E es el módulo de elasticidad del material también llamado módulo de Young, y δ es la deformación del material.

Expresando el esfuerzo en función de la fuerza aplicada, F , por unidad de área, A , obtenemos

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (2.2)$$

Sustituyendolo en la Ec. [2.1], y poniendo a la fuerza en función de la aceleración de la gravedad, tendremos que la deformación que sufre un material como función de su propio peso es

$$\delta = \frac{mg}{EA}, \quad (2.3)$$

donde m es la masa del material y g es la aceleración de la gravedad.

2.2 Deformación de una viga.

La teoría simple de curvatura elástica establece que (Hearn 1985)

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{\delta} = \frac{E}{R}, \quad (2.4)$$

donde M es el momento de curvatura aplicada, I es el segundo momento de curvatura de sección transversal de la barra sobre el eje neutral, σ es el esfuerzo a una distancia δ desde el eje neutral de la sección transversal de la barra, E es el módulo de elasticidad de Young para el material de la barra y R es el radio de curvatura de la sección desde el eje neutral.

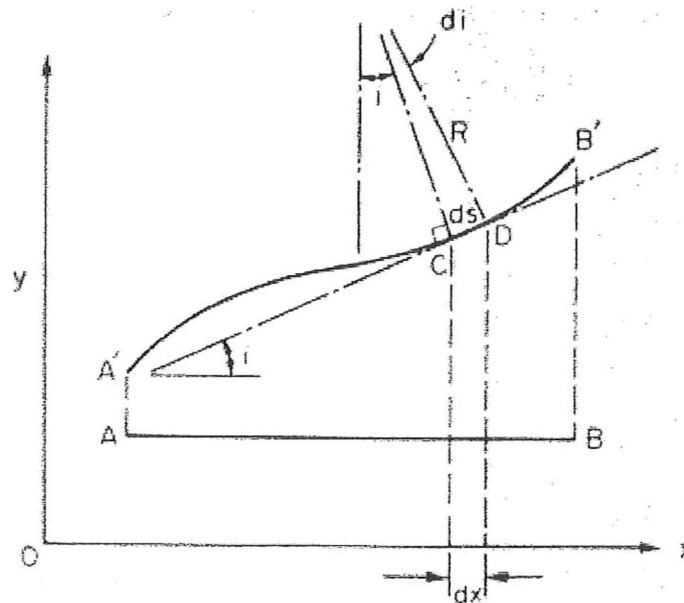


Figura 2.1. Deformación de una barra AB por su propio peso.

Consideremos una barra AB que inicialmente se encuentra horizontal y sin soportar carga alguna (Figura 2.1). Si esta barra se mueve a una nueva posición A'B' ésta se deforma por su propio peso, y la inclinación i , en cualquier punto arbitrario C será:

$$i = \frac{d\delta}{dx}. \quad (2.5)$$

Esta deformación es generalmente muy pequeña en la práctica y para curvaturas pequeñas tenemos que $ds = dx = Rdi$, y entonces

$$\frac{di}{dx} = \frac{1}{R}. \quad (2.6)$$

Sustituyendo la Ec. [2.5] en la Ec. [2.6] tenemos que

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2\delta}{dx^2}. \quad (2.7)$$

De la teoría simple de curvatura elástica (Ec [2.4]) $\frac{1}{R} = \frac{M}{EI}$, sustituyendolo en la Ec.

[2.7] tenemos que

$$M = EI \frac{d^2\delta}{dx^2}. \quad (2.8)$$

Esta es la ecuación diferencial básica para la deformación de vigas, donde la deformación o deflexión se encuentra implícita en esta ecuación diferencial de segundo orden.

El ejemplo clásico de deformación en dos dimensiones es el problema de una viga. Considerese una viga de cualquier material soportada en sus extremos, y con un peso w distribuido uniformemente a lo largo de dicha viga como se muestra la Figura 2.2.

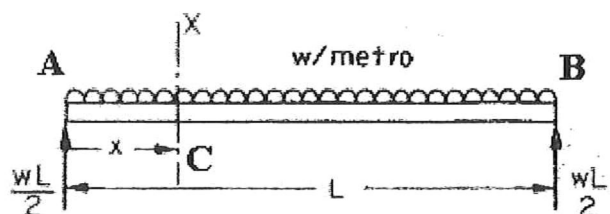


Figura 2.2. Viga con un peso w soportada en sus extremos.

El momento de curvatura en cualquier punto C, a una distancia x de A, está dado por (Hearn 1985)

$$M = \frac{wL}{2}x - (wx)\frac{x}{2}. \quad (2.9)$$

De la Ec. [2.8]

$$M_{xx} = EI \frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}. \quad (2.10)$$

Resolviendo esta ecuación con la condición de que la viga está fija en sus extremos ($y = 0$ en $x = 0, L$)

$$\delta = \frac{1}{EI} \left[\frac{wLx^3}{12} - \frac{wx^4}{24} - \frac{wL^3x}{24} \right]. \quad (2.11)$$

La máxima deformación ocurre en el centro de la barra cuando $x = L/2$, por lo tanto la deformación máxima será

$$\delta_{\max} = -\frac{5wL^4}{384EI}. \quad (2.12)$$

El segundo momento de área I está definido como

$$I = \int y^2 dA, \quad (2.13)$$

que se integra sobre el espesor t de la barra desde el eje neutral de la misma barra

$$I = B \left[\frac{y^3}{3} \right]_{-t/2}^{t/2} = \frac{Bt^3}{12}, \quad (2.14)$$

donde B es el ancho de la barra. El peso w lo podemos escribir en términos de la densidad del material

$$w = \rho g t \quad (2.15)$$

Para sólidos compresibles podemos definir nuevamente el módulo de Young E clásico en función de la razón de Poisson ν , como (Hearn 1985)

$$\frac{E'}{(1-\nu^2)}. \quad (2.16)$$

Sustituyendo las Ecs. [2.14], [2.15] y [2.16] en la Ec. [2.12] tenemos que

$$\delta_{\max} = -\frac{5}{32B} \frac{\rho g L^4 (1-\nu^2)}{E' t^2}. \quad (2.17)$$

Ésta es la manera en que se deforma una barra soportada en sus extremos. A continuación se encontrará la deformación de una placa circular soportada por un anillo concéntrico (sección 2.3), y se confrontará este resultado con el del caso de una viga para encontrar una similitud entre ambas.

2.3 Deformación de una placa circular

La deformación de una placa circular bajo varias cargas y condiciones de soporte, se encuentra dada por la ecuación fundamental de deflexión (Hearn 1985)

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\delta}{dr} \right) \right] = -\frac{Q}{D}, \quad (2.18)$$

donde δ es la deflexión al radio r ; $d\delta/dr$ es la curvatura a un radio r ; Q es la carga aplicada o la fuerza compartida por unidad de longitud, generalmente dada como función del radio; $D = Et^3 / [12(1-\nu^2)]$; t es el grosor de la placa circular y ν es la relación de Poisson.

Para una carga uniformemente distribuida (con una presión q) y soportada en su borde por un anillo circular, la Ec. [2.18] se convierte en (Hearn 1985)

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\delta}{dr} \right) \right] = -\frac{qr}{2D},$$

que por integración directa nos lleva a

$$\frac{d\delta}{dr} = -\frac{qr^3}{16D} + \frac{C_1 r}{2} + \frac{C_2}{r}, \quad (2.16)$$

donde C_1 y C_2 son constantes de integración.

Realizando una nueva integración obtenemos.

$$\delta = -\frac{qr^4}{64D} + \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln r + C_3, \quad (2.17)$$

donde C_3 es la nueva contante de integración.

Si la curvatura no es infinita en el centro de la placa entonces $C_2 = 0$. Tomando el origen en el centro de la placa entonces $\delta = 0$ y $C_3 = 0$. En los bordes donde $r = R$, $d\delta/dr = 0$, y sustituyendo en la Ec. [2.19] obtenemos:

$$C_1 = \frac{qR^2}{8D}$$

Un valor extremo de la deflexión de la placa estará en el centro, pero ya que el centro se ha usado como origen, la ecuación de deflexión dará como resultado $\delta = 0$ a $r = 0$. Esto es natural ya que ésta fue una de las condiciones para obtener una de las constantes.

La deflexión δ tiene un máximo en los bordes, por lo que de la Ec. [2.20]

$$\delta_{\max} = \frac{qR^4}{64D} + \frac{qR^4}{32D} = \frac{qR^4}{64D}. \quad (2.21)$$

La presión q , debida a su propio peso se puede expresar como $q = \rho g t$, así que

$$\delta_{\max} = \frac{3}{16} \frac{(1-\nu^2)}{E} \rho g \frac{R^4}{t^2}, \quad (2.22)$$

que es muy parecido al caso de una viga soportada en dos puntos que se vió en la sección anterior (Ec. [2.17]) donde la deflexión también se expresa por un polinomio de cuarto grado.

En la teoría de placas delgadas donde sólo la curvatura de flexión contribuye a la deformación de la placa y los efectos compartidos son ignorados, la deflexión de una placa circular toma la forma (Nelson et al. 1982)

$$\delta_{rms} = k \frac{q R^4}{D}, \quad (2.23)$$

donde δ_{rms} es la deformación cuadrática media. Ésta es de la misma forma que se presentó en la Ec. [2.21], sólo que de una manera más general y k es un parámetro que depende ahora de la naturaleza de la configuración del soporte.

Si tomamos en cuenta que la presión q esta dada por $(= \rho g t)$, donde ρ es la densidad del material, sustituyendo en la Ec. [2.23] los valores de q y D obtenemos:

$$\delta_{rms} = k \frac{\rho g R^4}{E t^2} [12(1-\nu^2)]. \quad (2.24)$$

Por lo que las deflexiones, de una placa circular simplemente soportada se regirán por la ley de escalamiento que muestra que varían como

$$\delta \propto \frac{R^4}{t^2}. \quad (2.25)$$

En el caso particular de una membrana circular de área A

$$R^4 = \frac{A^2}{\pi^2}. \quad (2.26)$$

Para placas no circulares una forma más generalizada de esta relación sería

$$\delta_{rms} = \xi \frac{qA^2}{D} \propto \frac{A^2}{t^2}, \quad (2.27)$$

donde A es el área de la placa y ξ , la eficiencia del soporte, es un parámetro adimensional que depende de la configuración del soporte. Esta forma es útil por ejemplo para estimar la deflexión de placas hexagonales, una forma deseable en espejos segmentados.

Cuando se calcula la deflexión en N puntos de soporte se debe considerar el área por punto de soporte en lugar del área por sí sola. Entonces se puede manejar la deflexión rms de un espejo soportado por N puntos de la siguiente manera (Nelson et al. 1982)

$$\delta_{rms} = \gamma_N \frac{q}{D} \left(\frac{A}{N} \right)^2, \quad (2.28)$$

donde γ_N es un factor dependiente de la geometría del soporte y tiene un valor del orden de 10^{-3} . De esta manera, una vez conocido el factor γ_N , la deflexión de un espejo de cualquier tamaño puede ser calculada.

3. Calidad de Imagen Óptica

En el capítulo anterior se presentaron los aspectos más importantes de la deformación de una placa circular. Se encontró que la deflexión es una función del área de la placa, su espesor, el parámetro de Poisson del material con que está hecha, y de la presión aplicada. Considerando al espejo primario como una placa circular, es de esperar que éste se deforme bajo su propio peso. Esta deformación no es constante ya que depende de la posición del telescopio. Las deformaciones incidirán directamente en la calidad de las imágenes debido a las aberraciones ópticas que producirán. En este capítulo se presentan los conceptos de calidad de imagen y aberración óptica. Se presenta también el modelo matemático de las aberraciones para saber cuánto y cómo deformar el espejo para obtener la calidad de imagen requerida.

3.1 Imagen Puntual al Límite de Difracción.

Una imagen se produce cuando un objeto ilumina una apertura, provocando que exista interferencia en el punto focal, y cuya intensidad conforma la imagen del objeto.

Considerando un objeto **O** que ilumina una apertura **A** (Born & Wolf 1975) como el que se muestra en la Figura 3.1.

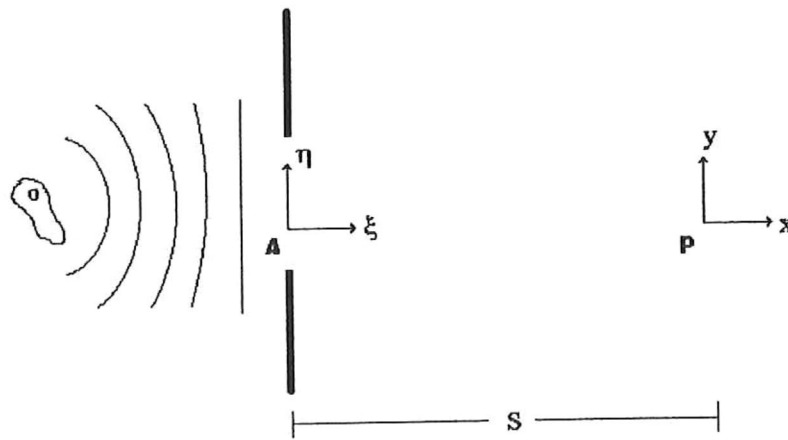


Figura 3.1. Objeto **O** ilumina una apertura **A**, donde se estudia el campo eléctrico en el plano focal **P**, a una distancia **S** de la apertura.

El campo eléctrico en la apertura esta dado por

$$\vec{E}(\xi, \eta) = E_0(\xi, \eta) e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}. \quad (3.1)$$

Este campo se propaga hasta el punto (x, y) en el plano focal $\mathbf{P}$, de tal forma que en cada punto (x, y) se observa la superposición de los campos eléctricos de todos los puntos de la apertura, de esta manera siguiendo a Kirchhoff (Born & Wolf 1975) el campo eléctrico en el punto (x, y) estará dado por

$$\vec{E}(x, y) = B \iint d\xi d\eta \left(\frac{\vec{E}(\xi, \eta) e^{-i\vec{k} \cdot ((\vec{x}, \vec{y}) - (\vec{\xi}, \vec{\eta}))}}{S} \right), \quad (3.2)$$

donde B es una variable dependiente ($B = e^{-i\omega t}$) del tiempo y no de la posición. De acuerdo al principio de Huygens, al ser cada punto de la apertura un emisor de ondas esféricas secundarias, el vector $\vec{k}$ (número de onda $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$) es paralelo a los vectores de posición $\vec{r} = [(\vec{x}, \vec{y}) - (\vec{\xi}, \vec{\eta})]$, si $|\vec{r}|$ lo consideramos igual a S donde

$$S^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2. \quad (3.3)$$

Desarrollando S^2 tenemos que

$$S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - 2(x\xi + y\eta) + \xi^2 + \eta^2, \quad (3.4)$$

si consideramos que $x^2 + y^2 + z^2$ es un punto a una distancia S' cuando el haz luminoso pasa por el origen en la apertura, y si además suponemos que la apertura es muy pequeña comparada con la distancia S' , podemos expandir a S en series de potencia.

$$S \approx S'^{1/2} - \frac{x\xi + y\eta}{S'} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2S'} - \frac{(x\xi + y\eta)^2}{2S'^3} - \dots \quad (3.5)$$

Considerando sólo los dos primeros términos de la serie

$$E(x, y) = \iint_A d\xi d\eta \frac{E_0(\xi, \eta)}{S} e^{\frac{2\pi i}{\lambda} S} e^{-\frac{2\pi i}{\lambda} \left(\frac{x\xi}{S} + \frac{y\eta}{S} \right)}. \quad (3.6)$$

Parte de esta integral es una transformada de Fourier, la transformada de la función $G(\xi, \eta)$ llamada la función pupila.

$$G(\xi, \eta) = \frac{E_0(\xi, \eta)}{S} e^{\frac{2\pi i}{\lambda} S}, \quad (3.7)$$

con valores

$$G(\xi, \eta) \begin{cases} = C & \text{constante en todos los puntos de la apertura} \\ = 0 & \text{fuera de la apertura} \end{cases}. \quad (3.8)$$

Así la integral puede escribirse como

$$E(x, y) = \iint_A G(\xi, \eta) e^{-\frac{2\pi i}{\lambda} \left(\frac{x\xi}{S} + \frac{y\eta}{S} \right)} d\xi d\eta, \quad (3.9)$$

y la integral se extiende sobre todo el plano (ξ, η) .

Por conservación de la energía, toda la energía que alcanza el plano de observación deberá ser igual a ε (la energía de la fuente), así que la condición de normalización es

$$\iint |E(x, y)|^2 dx dy = \frac{\varepsilon}{R^2}, \quad (3.10)$$

donde R es la distancia del origen en el centro de la apertura hasta la línea que sale del objeto "O" y atraviesa el plano.

Por el teorema de Parseval

$$\iint |G(\xi, \eta)|^2 = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \iint |E(x, y)|^2 dx dy. \quad (3.11)$$

Sustituyendo Ecs. [3.8] y [3.10] en la ecuación anterior y denotando por D el área de la apertura:

$$\frac{\varepsilon}{\lambda^2 R^2} = |C|^2 D, \quad (3.12)$$

donde

$$C = \frac{1}{\lambda R} \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}}. \quad (3.13)$$

Entonces la Ec. [3.9] toma la forma

$$E(x, y) = \frac{1}{\lambda R} \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}} \iint_A e^{-ik(x\xi + y\eta)} d\xi d\eta. \quad (3.14)$$

Si denotamos la intensidad $I_0 = |E(0,0)|^2$ en el centro del patrón, donde $x = y = 0$,

entonces tenemos

$$I_0 = \left(\frac{1}{\lambda R}\right)^2 \frac{\varepsilon}{D} \left(\iint_A d\xi d\eta\right)^2 = \frac{\varepsilon D}{\lambda^2 R^2} = C^2 D^2, \quad (3.15)$$

donde C es una constante que depende de la intensidad en el punto P, por lo tanto dependerá del área y la forma de la apertura.

3.2 La Apertura Circular

Cuando la apertura es circular, la forma geométrica del problema, sugiere usar coordenadas polares, siendo (ρ, θ) coordenadas polares para un punto (ξ, η) típico en la apertura.

$$\xi = \rho \cos \theta, \quad \eta = \rho \sin \theta, \quad (3.16)$$

y sean (ω, ψ) las coordenadas del punto P en el patrón de difracción.

$$x = \omega \cos \psi, \quad y = \omega \sin \psi, \quad (3.17)$$

por definición de x e y , tenemos que $\omega = \sqrt{x^2 + y^2}$ es el seno del ángulo con la dirección (x, y) que hace con la dirección central donde $x = y = 0$, la integral de la Ec. [3.9] de la sección 3.1 en un campo eléctrico constante (iluminación uniforme) se convierte en

$$E(P) = C \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-ik\rho\omega \cos(\theta-\psi)} \rho d\rho d\theta. \quad (3.18)$$

Ya que las funciones de Bessel $J_n(z)$ se pueden representar como

$$\frac{i^{-n}}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{ix \cos \alpha} e^{in\alpha} d\alpha = J_n(x), \quad (3.19)$$

la Ec. [3.18] se puede escribir como

$$E(P) = 2\pi C \int_0^a J_0(k\rho\omega) \rho d\rho. \quad (3.20)$$

Utilizando la formula de recurrencia de las funciones Bessel

$$\frac{d}{dx} \{x^{n+1} J_{n+1}(x)\} = x^{n+1} J_n(x), \quad (3.21)$$

para $n = 0$ se tiene

$$\int_0^x x' J_0(x') dx' = x J_1(x). \quad (3.22)$$

De las Ecs. [3.20] y [3.22] se tiene que:

$$E(P) = CD \left[\frac{2J_1(ka\omega)}{ka\omega} \right], \quad (3.23)$$

donde $D = \pi a^2$. Entonces la intensidad esta dada por

$$I(P) = |E(P)|^2 = \left[\frac{2J_1(ka\omega)}{ka\omega} \right]^2 I_0, \quad (3.24)$$

donde, $I_0 = C^2 D^2 = \frac{\epsilon D}{\lambda^2 R^2}$, es la formula que derivó por primera vez **Sir George**

Biddell Airy (1801-1892).

La distribución de la intensidad en la vecindad de la imagen geométrica, está caracterizada por la función

$$y = \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2 \quad (3.25)$$

La cual se puede interpretar mejor en la forma gráfica de la Figura 3.2.

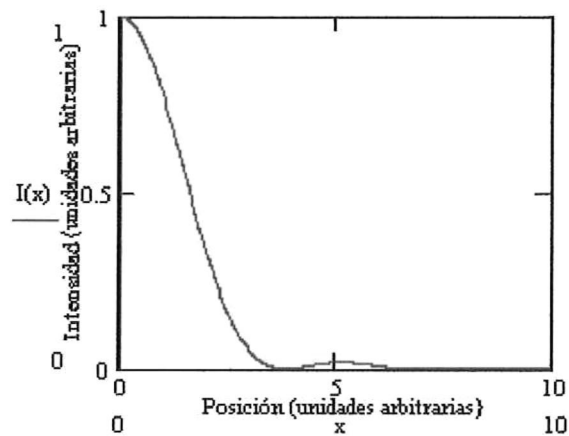


Figura 3.2. Gráfica de anillo de Airy.

donde se aprecia que la mayor parte de la energía está localizada alrededor de $x = 0$, como se puede apreciar en la gráfica de superficie de la Figura 3.3.

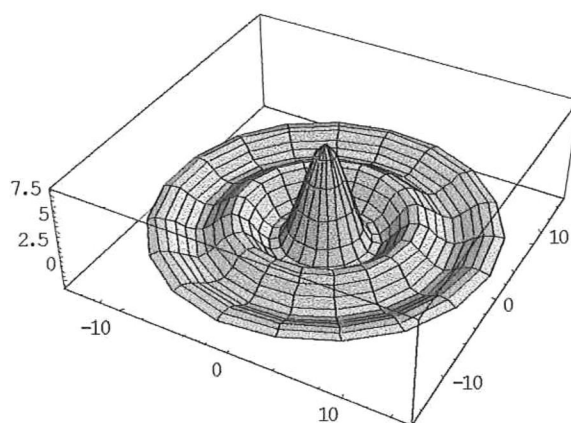


Figura 3.3. Anillos de Airy.

3.3 Aberraciones y Polinomios de Zernike.



Figura 3.4. Frente de onda con diferentes aberraciones.

Cuando el frente de onda no es plano como lo muestra la Figura 3.4, éste sufre un cambio al atravesar la distancia S (la distancia apertura - plano imagen). Esta distancia la podemos escribir como

$$S' = S_0 + \Phi(\xi, \eta), \quad (3.26)$$

donde $\Phi(\xi, \eta)$ es un cambio pequeño en la distancia, llamado fase, y entonces la función pupila es

$$G(\xi, \eta) = \frac{E_0(\xi, \eta) e^{\frac{2\pi i}{\lambda}(S_0 + \Phi(\xi, \eta))}}{S}. \quad (3.27)$$

Clásicamente, estos desfases o aberraciones se analizan haciendo una expansión en polinomios ortonormales de Zernike del desfase del frente de onda respecto al frente de onda plano ideal en cada punto de la pupila. En este trabajo usamos la normalización de Noll (1975) la cual define los polinomios de Zernike Z_n^m como

$$\Phi(\rho, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} Z_n^0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n A_{nm} Z_n^m, \quad (3.28)$$

donde

$$\begin{aligned} Z_n^0 &= \sqrt{n+1} R_n^0(\rho) \\ Z_n^m &= \sqrt{2} \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \begin{cases} \cos m\theta. \\ \sin m\theta \end{cases} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Además Z_n^m y Z_n^m cumplen con la propiedad de ortonormalidad y R_n^m se define como

$$R_n^{\pm m}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} ; \quad \rho \in [0,1] \quad (3.30)$$

De tal manera que el desfase del frente de onda $\Phi(\rho, \theta)$ modifica al campo eléctrico, y de ahí la intensidad, como

$$e^{\frac{-2\pi i}{\lambda} \Phi(\rho, \theta)}, \quad (3.31)$$

donde $\Phi(\rho, \theta)$ a su vez está dada por

$$\Phi(\rho, \theta) = \sum A_{nm}^R Z_{nm}^R(\rho, \theta) \quad , \quad (3.32)$$

donde Z_{nm}^R son los polinomios de Zernike.

Los primeros términos de estos polinomios representan las aberraciones clásicas observadas. Las expresiones para los primeros polinomios se muestran en la Tabla I.

Polinomios de Zernike (normalización RMS) $Z_{nm}^R(\rho, \theta)$					
Grado Radial	Frecuencia azimutal				
	m = 0	m = 1	m = 2	m = 3	m = 4
n = 0	1 constante				
n = 1	-	$2\rho \cos(\theta + \phi_{11})$ inclinación (tilt)			
n = 2	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$ desenfoque	-	$\sqrt{6}\rho^2$ $\cos(2\theta + \phi_{22})$ astigmatismo		
n = 3	-	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)$ $\cos(\theta + \phi_{31})$ coma	-	$\sqrt{8}\rho^3$ $\cos(3\theta + \phi_{33})$ coma triangular	
n = 4	$\sqrt{5}$ $(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$ esfericidad	-	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)$ $\cos 2\theta + \phi_{42})$ astig 5° ord	-	$\sqrt{10}\rho^4$ $\cos(4\theta + \phi_{44})$

Tabla I

La Figura 3.4 muestra la representación gráfica de estos polinomios así como el nombre característico de cada uno. De esta manera se tienen imágenes aberradas, donde la energía se sale de la región central del patrón de difracción (ver Figura 3.3).

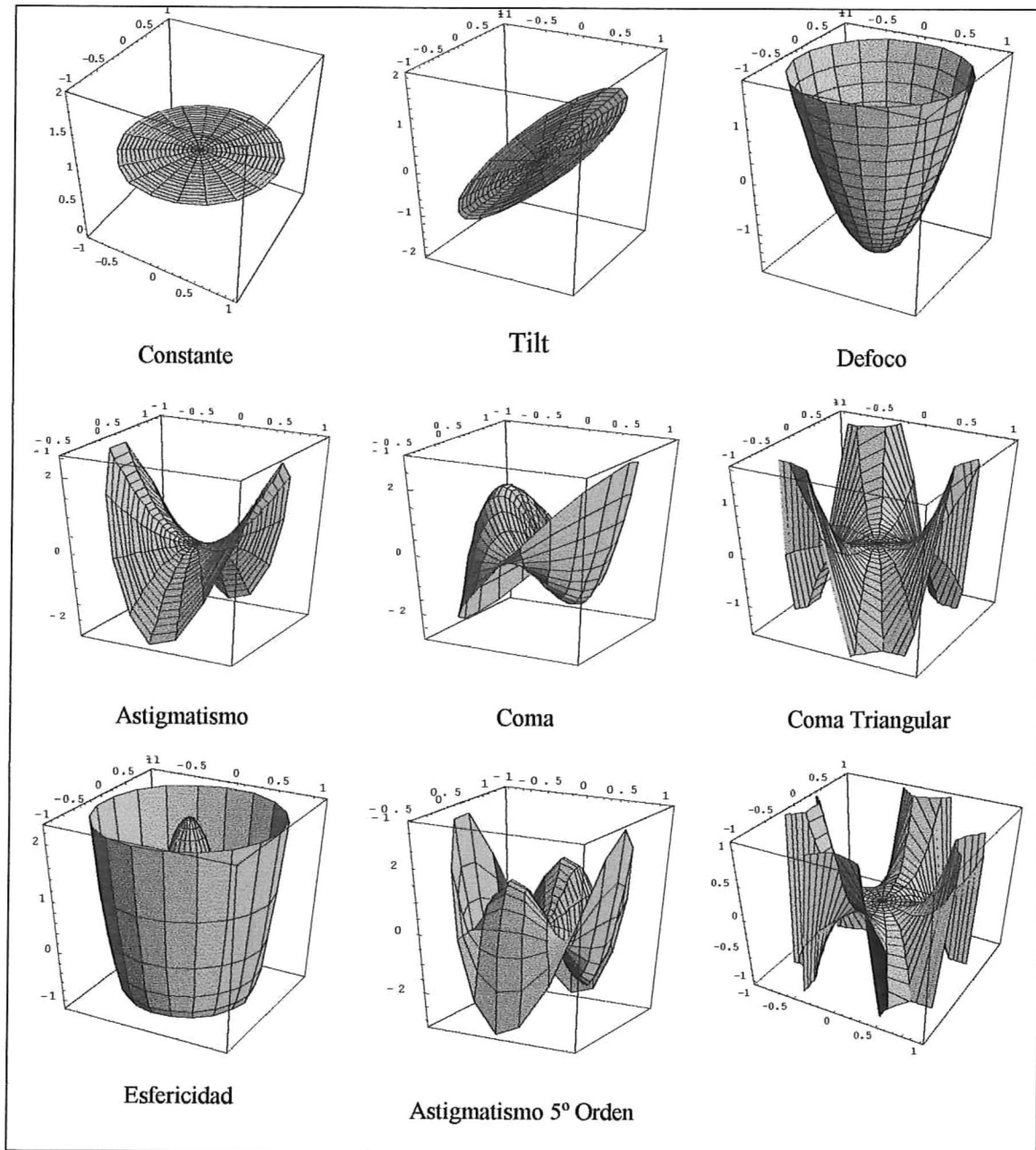


Figura 3.4. Polinomios de Zernike, aberraciones clásicas.

Como ejemplo, si tomamos el caso de astigmatismo ($n = 2, m = 2$), con una amplitud $A_{22} = 500$ nanómetros, podemos evaluar la función pupila, Ec. [3.27], tomando una pupila circular, y posteriormente el campo eléctrico resultante, Ec. [3.6], mediante una transformada discreta de Fourier. El cuadrado de este campo eléctrico es la intensidad y en la Figura 3.5 podemos ver la imagen de un objeto puntual afectado por 500 nm de astigmatismo. Al comparar esto con el caso ideal de la Figura 3.3 se observa una gran deterioro de la calidad óptica.

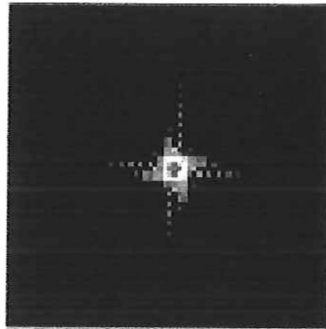


Figura 3.5. Imagen aberrada con 500nm de astigmatismo.

Un perfil de esta imagen se observa en la Figura 3.6, donde mucha energía ha salido de la zona central ($x = 0$). De hecho, el 80% de la energía queda ahora comprendida en un diámetro de 1.1 segundos de arco. Este caso es similar al del telescopio de 2.12m antes de la corrección activa, donde además se tenían otras aberraciones, tales como coma y esfericidad, pero la que prevalecía era el astigmatismo.

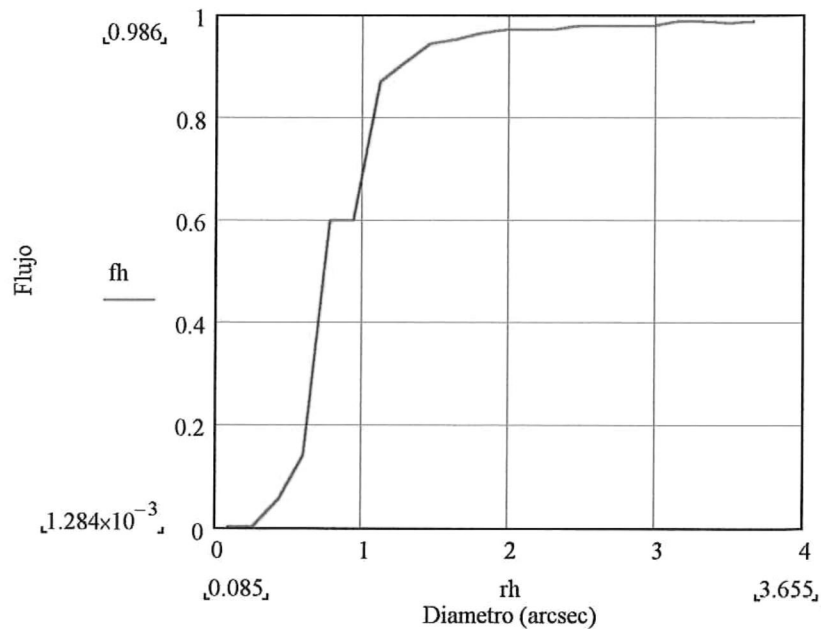


Figura 3.6. Flujo (que se muestra en porcentaje) de energía en una imagen afectada por astigmatismo, el 80% de su energía se encuentra en un diámetro de 1.1 segundos de arco.

Para apreciar aún mejor esta calidad de imagen podemos ver la Figuras 3.7 que muestran, la primera en contorno y la segunda en superficie, que la imagen que idealmente concebimos como un punto luminoso, o una imagen puntual, está completamente aberrada. Este tipo de imágenes eran las que se observaban en el telescopio de 2.12m antes de su corrección.

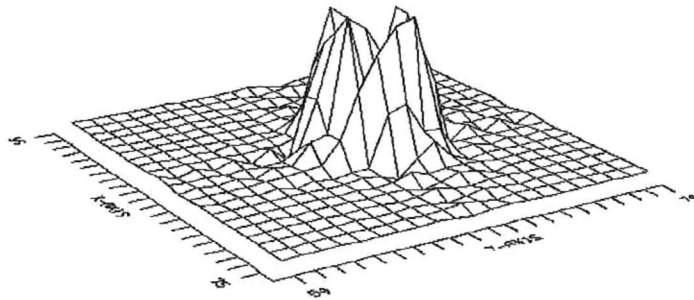
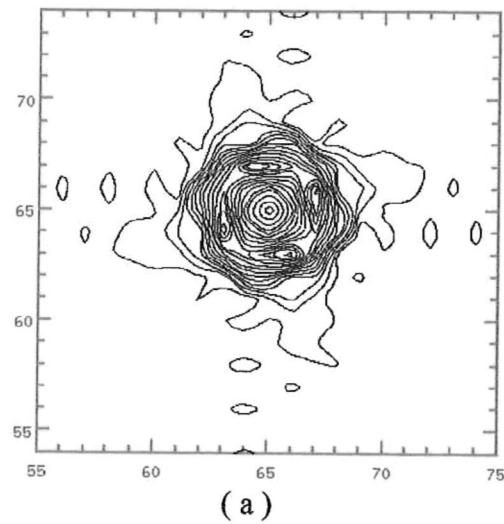


Figura 3.7. Imágenes de intensidad de una imagen afectada con 500 nm de astigmatismo.

4. Soporte del Espejo Primario.

El espejo primario del telescopio de 2.12m originalmente descansaba sobre tres bolsas de aire soportadas por una celda de acero. La presión de estas bolsas de aire era variada de manera proporcional al coseno del ángulo de inclinación del telescopio, conformando así un soporte bastante confiable para el espejo, aunque con los problemas de aberración explicados en el Capítulo 3. Además de las bolsas, el espejo se mantiene fijo lateralmente por medio de un cinturón de mercurio, evitando deslizamientos cuando cuando el telescopio es inclinado.

El propósito de este capítulo es justificar el nuevo soporte consistente en 18 actuadores neumáticos y 3 puntos fijos. También se determina la precisión con que estos actuadores deben controlarse y su ubicación óptima.

4.1 Número de Actuadores

Se puede estimar el número de soportes del espejo primario y la posición de cada uno de estos en la celda, siguiendo a Nelson (1982), quien argumenta que la curvatura rms para un espejo delgado soportado por N soportes, está dado por la Ec. [2.28] de la sección 2.3, la cual escribiremos en este capítulo como la Ec. (4.1). En un sistema activo los soportes se convierten en actuadores. Estos actuadores permiten deformar el espejo para corregir las aberraciones ópticas

$$\delta_{rms} = \gamma_N \frac{q}{D} \left(\frac{A}{N} \right)^2. \quad (4.1)$$

donde γ_N es el factor dependiente de la geometría de los soportes (del orden de 10^{-3}), q es la fuerza aplicada (o peso) por unidad de área, D es $Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$ la rigidez de flexión, ν es la razón de Poisson, E es el modulo de Young, A es el área del espejo, N es el número de puntos de soporte, y h es el espesor del espejo (26 cm).

Deformaciones adicionales son producidas por fuerzas compartidas en la posición de los soportes. Estas pueden incrementar la curvatura promedio en un factor de 2, pero se reducen sustancialmente cuando el tamaño de los soportes se incrementa (Arnold 1996). Para decidir el número de soportes y su área para el telescopio de 2.12m se comenzó por comparar el caso del telescopio de 2.12m con el del NTT (Willson 1987).

Analizando la Ec. [4.1], el factor q/D depende solamente de h para un material dado (como h^{-2}). Esto es aproximadamente lo mismo para los espejos del telescopio 2.12m y del NTT). El factor (N/A) es la densidad de los soportes, que están relacionados con la separación promedio entre ellos. La expresión para δ_{rms} es derivada considerando los soportes puntuales. El tamaño tiene un gran efecto cuando hay desviaciones δ_{rms} significativas. Por ejemplo, un solo soporte ($N = 1$), del tamaño del espejo primario es capaz de soportarlo adecuadamente (δ_{rms} pequeña). Se propuso que incrementando el área de los soportes se tendría el efecto de hacer más pequeña la distancia promedio entre ellos, de tal manera que el área no soportada debería remplazar A , de tal manera que $A = A_m - NA_b$, donde A_m es el área del espejo y A_b es el área de cada una de los soportes. De esta manera, un conjunto de 18 actuadores, neumáticos, o bolsas de aire, de 33 cm de diámetro pueden ofrecer la misma deflexión rms que un sistema de soporte NTT con 78 actuadores (Salas y Pedrayes 1992).

En contraste, de acuerdo con el principio de elasticidad de Saint Venant's (Arnold, 1996), el tamaño de cada una de las bolsas no deberá tener efecto alguno sobre las deformaciones del espejo a distancias muy grandes comparadas con el tamaño de las bolsas. Puesto que el objetivo principal es el de corregir el astigmatismo en el telescopio de 2.12m, la escala de distancias bajo consideración es 100cm (Salas et. al. 1997). Esto quiere decir que la distancia entre los máximos y los mínimos en la imagen con astigmatismo se encuentran a distancias del orden de 100 cm.

Incrementar el tamaño de las bolsas, tiene la doble ventaja de minimizar el efecto de fuerzas compartidas y minimizar la complejidad del sistema neumático, puesto que se requiere manejar presiones más bajas.

La Figura 4.1 muestra la distribución de los 18 soportes propuestos para el espejo primario de 2.12m (Salas y Pedrayes 1992)

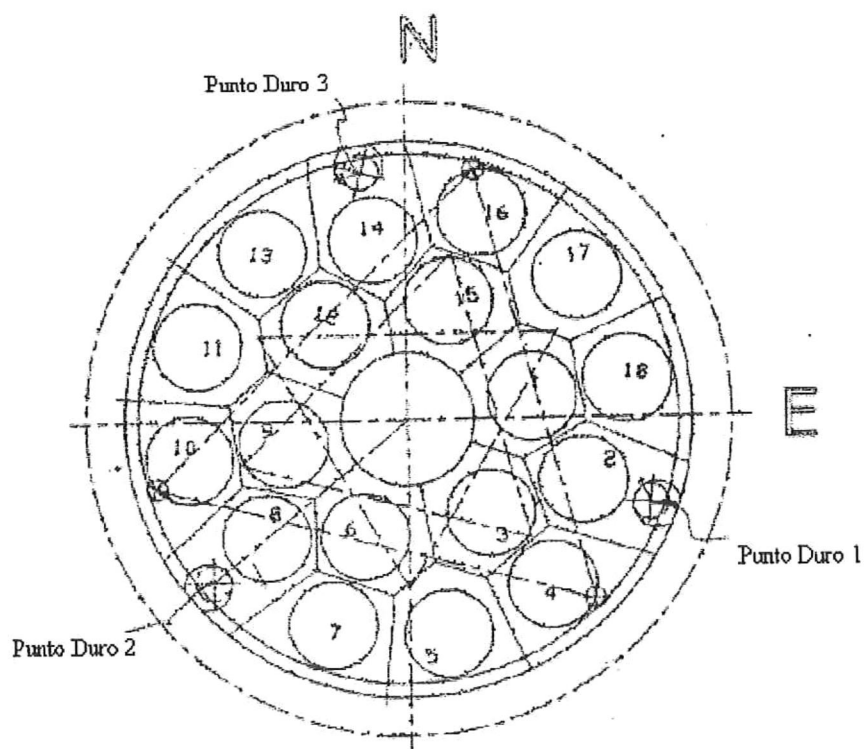


Figura 4.1. Distribución de 18 actuadores neumáticos y tres puntos duros en la celda contenedora del espejo primario del telescopio de 2.12m.

4.2 Calidad de imagen obtenida

En el Capítulo 2, se encontró que una placa soportada por un anillo era muy parecido al resultado obtenido por una viga soportada en sus extremos. Debido a esta dependencia tan fuerte, en la separación de soportes, o del radio del anillo de soporte en el caso de una placa, hacemos la siguiente aproximación. Si consideramos una placa múltiplemente soportada en N puntos (ver cruces en la Figura 4.2) y queremos considerar la deflexión en un punto cualquiera (el asterisco), buscaremos el círculo que pase por los 3 soportes más cercanos, y a partir de ahí, calcularemos la deflexión de acuerdo a la Ec. (2.21).

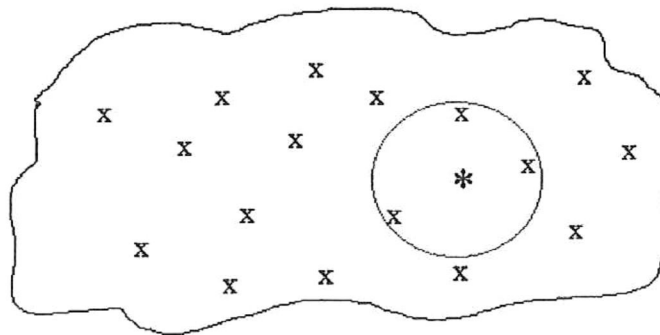


Figura 4.2. Placa múltiplemente soportada por N puntos.

Esta aproximación funciona correctamente ya que el punto donde la deflexión es máxima es justamente en el centro del triángulo definido por cada triada de soportes (ya que es el punto más lejano de los soportes), y por otro lado, a medida que nos acercamos a un soporte, la deflexión disminuye muy fuertemente en cualquier caso a la cuarta potencia.

En la Figura 4.3 (Salas y Pedrayes 1992) se aprecian las deflexiones calculadas si se aplica la Ec. [2.28] de la sección 2.3.

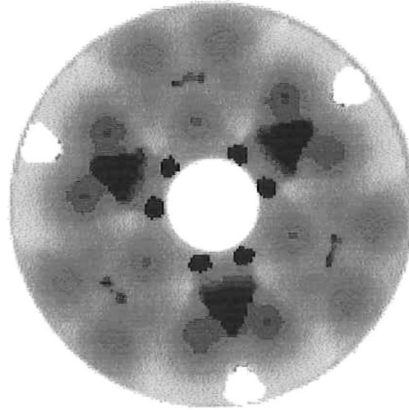


Figura 4.3. Deflexiones calculadas para las 18 bolsas.

La imagen producida por un frente de onda electromagnético, inicialmente plano, que rebota en esta superficie, se puede obtener con los métodos indicados en el Capítulo 3. El frente de onda sufre un desfazamiento Φ igual al doble de las deflexiones de la superficie, tomando la Ec. [3.27], y sustituyendo en la Ec. [3.9] del campo eléctrico se puede obtener la intensidad ya que sabemos tiene la forma de la ecuación:

$$I = |E|^2 \quad (4.2)$$

La imagen resultante se muestra en la Figura 4.4 en contorno (a) y en superficie (b), una evaluación de la concentración de la energía en la Figura 4.5 muestra que el 80% de la luz queda inscrita en un círculo de 0.56" (segundos de arco) de diámetro (d_{80}). La diferencia se puede apreciar al comparar estas imágenes con las Figuras 3.6 y 3.7, del Capítulo 3, donde se aprecia una marcada diferencia.

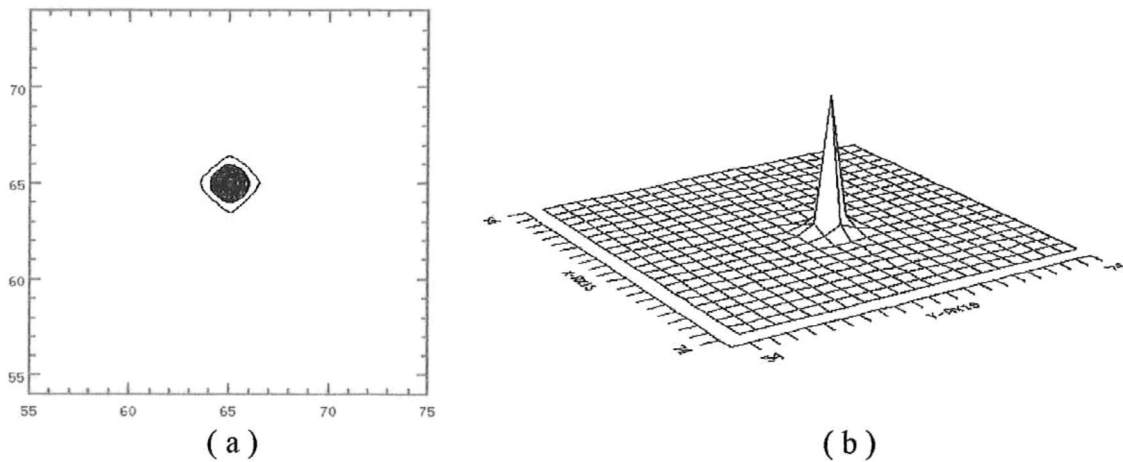


Figura 4.4

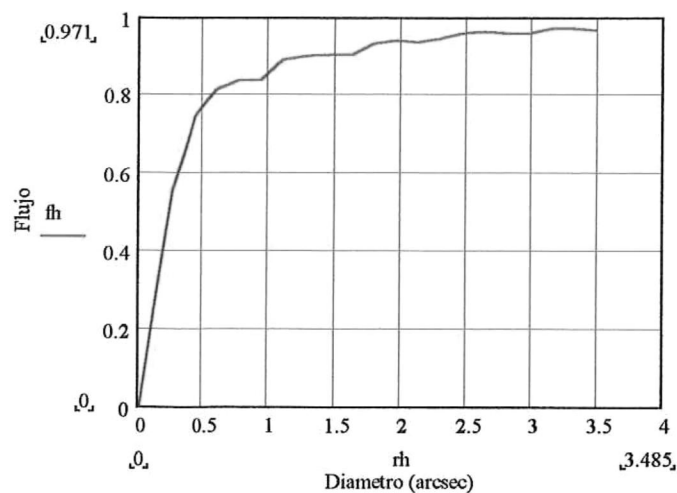
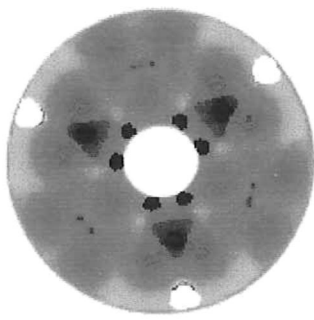


Figura 4.5. El 80% del flujo de energía se encuentra contenido en un diámetro de 0.56 segundos de arco.

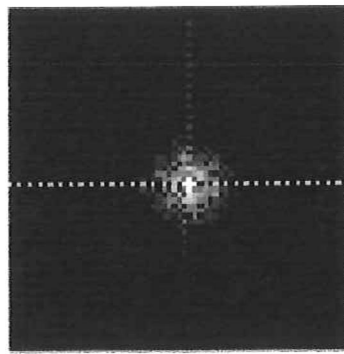
El programa desarrollado (Salas y Pedrayes 1992) también permite introducir errores aleatorios en las presiones de soporte de las 18 bolsas. Cuando se introducen errores de 1%, la calidad de imagen se deteriora poco ($d_{80} = 0.58$ segundos de arco), mientras que errores mayores, de 10% y 30% ocasionan un deterioro mayor ($d_{80} = 0.66$ a 1.06 segundos de arco).

Por lo tanto se decidió que el número de actuadores propuestos y su distribución eran correctos y que era necesario controlar la presión de los actuadores a un 1% de precisión para lograr el objetivo de que el 80% de la radiación se mantenga en un diámetro de 0.58".

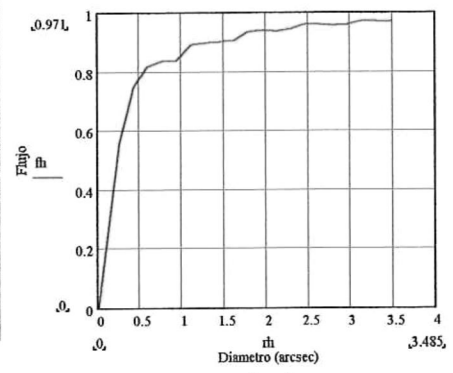
Los errores de 1% se pueden apreciar en la Figura 4.6. Los errores de 10%, se aprecian en la Figura 4.7. Los errores de 30% se aprecian en la Figura 4.8.



(a)

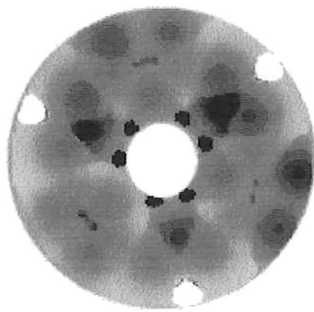


(b)

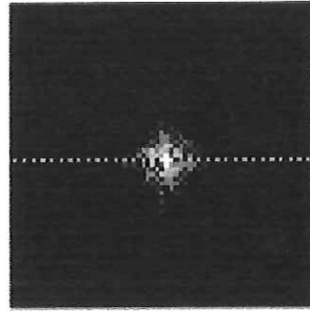


(c)

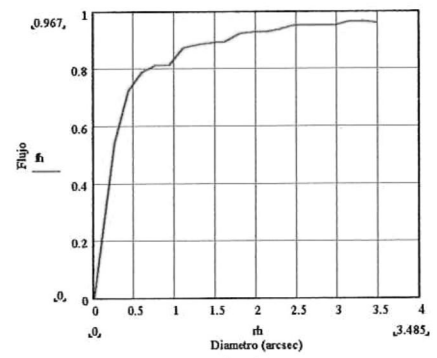
Figura 4.6



(a)

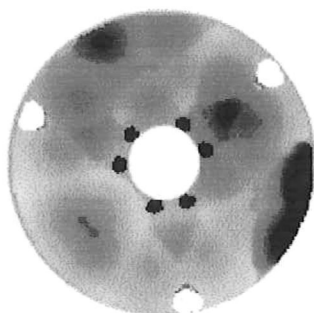


(b)

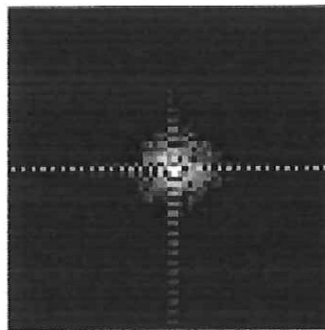


(c)

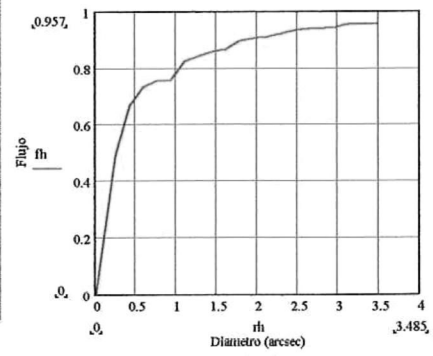
Figura 4.7



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8

4.3 Puntos Duros

Como lo vimos en la sección 4.2, sólo se necesitan 3 puntos en una placa o en un espejo para posicionarlo, estos 3 puntos deberán cargar aproximadamente el mismo peso. Siguiendo el desarrollo del NTT, se propuso que el peso aproximado para cada uno de estos tres puntos (puntos duros) fuese el 2% del peso total del espejo, que es la proporción de área del espejo que soportan. Como este espejo pesa aproximadamente 2000 kg, el peso aproximado que cargará cada punto duro será de $w_p = \frac{40}{3} = 13.33\text{kg}$ al cenit.

El diseño de estos soportes estuvo a cargo del departamento de mecánica del Instituto de Astronomía de la U.N.A.M. en Ensenada.

El diseño permite desacoplar el movimiento lateral por contactos esféricos y su sistema axial de baleros permite ajustar la altura con el tornillo sin que gire la celda de carga. La gran rigidez de estos puntos duros ($\approx 0.1\mu\text{m/Kg}$) permite un corrimiento inferido de carga, con un error de inclinación imperceptible. Estos puntos duros se encuentran localizados en la celda como lo muestra la Figura 4.1, y su detalle de construcción se puede apreciar en la Figura 4.9. Estos puntos permiten medir el peso que soportan por medio de una celda de carga.

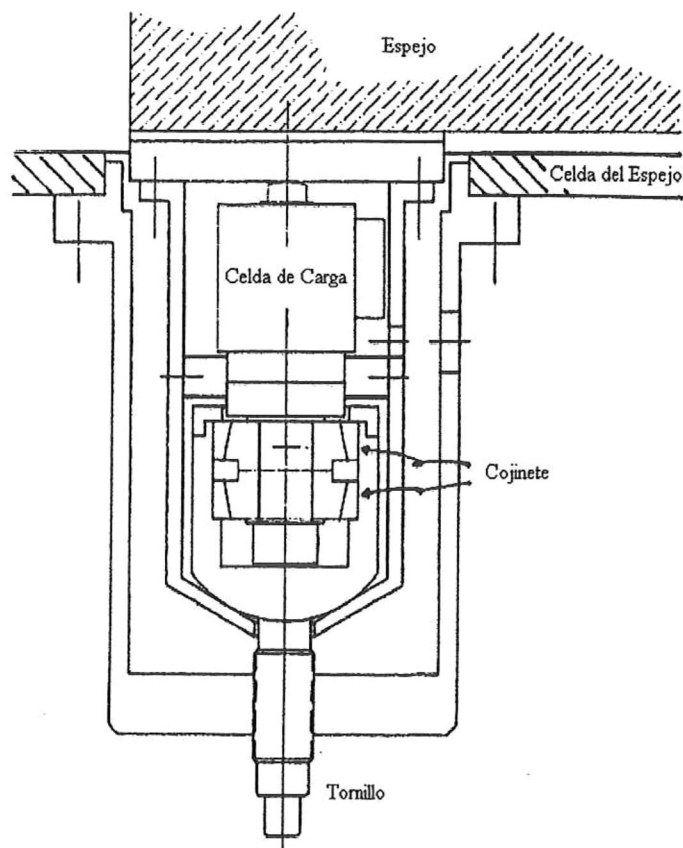


Figura 4.9. Diseño de celda de carga.

4.4 Variaciones de soporte con la inclinación

La presión en cada actuador contiene tres términos; uno para soportar el peso del espejo; uno para desempeñar las deformaciones deseadas; y un tercer término para corregir las presiones basadas en el peso soportado por cada uno de los puntos duros.

Así la presión del actuador, P_i , esta expresada por

$$P_i = P_{wi} \cos z + P_{di} + PID \left(\sum_j K_{i,j} E_{pj} \right); \quad i = 1..18, j = 1..3, \quad (4.3)$$

P_{wi} es la presión que soporta cada porción de espejo en el cenit, z es el ángulo cenital, P_{di} la presión para lograr la deformación deseada; y PID es un algoritmo proporcional integral derivativo que corrige la presión basada en el error de cada uno de los puntos duros E_{pj} y una función de propagación $K_{i,j}$. Una discusión más amplia de esta ecuación y del algoritmo PID implementado se encuentra en Carrillo (1997).

Para obtener la inclinación del telescopio con respecto al cenit en todas las posiciones se requiere de un dispositivo auxiliar.

Cuando el presente proyecto comenzó el telescopio de 2.12 m utilizaba tres bolsas de aire que variaban su presión a través de un inclinómetro neumático, fabricado por Boller and Chivens. Este inclinómetro tiene la facultad de que su presión varía de 0 a 1 psi, con el coseno del ángulo de inclinación. En el Capítulo 6 se verán los detalles de su adaptación a la electrónica. Dicho inclinómetro se muestra en la Figura 4.10, montado en la celda del telescopio de 2.12 m.

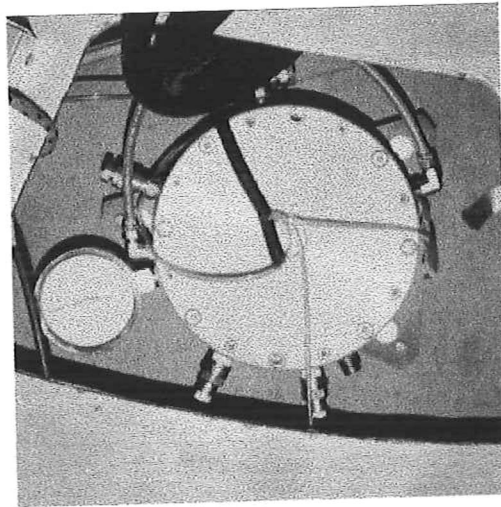


Figura 4.10 Inclinómetro neumático fabricado por Boller and Chivens.

5. Circuitos Electrónicos de Control

5.1 Descripción a Bloques de la Electrónica

Hasta este punto del presente trabajo se sabe que es posible deformar el espejo primario del 2.12 m, también se sabe la calidad de imagen que se tiene y esperada, así como las herramientas necesarias para lograrlo. En este capítulo se plantea la manera en la que se desempeñará dicha tarea, así como la precisión con la que la electrónica deberá desempeñarse (1%) para lograr nuestro objetivo comentado en el Capítulo 4; lograr contener el 80% del flujo de energía dentro de un diámetro de 0.6 segundos de arco.

Se describirá a fondo la electrónica empleada para implementar el lazo de control de presión y posición, así como los detalles de su diseño y funcionamiento.

5.1.1 Lazo de Control de Presión

El propósito del sistema activo es controlar la presión en cada uno de los actuadores (bolsas de aire). Para esto se requiere de un lazo de control de presión como el mostrado en la Figura 5.1.

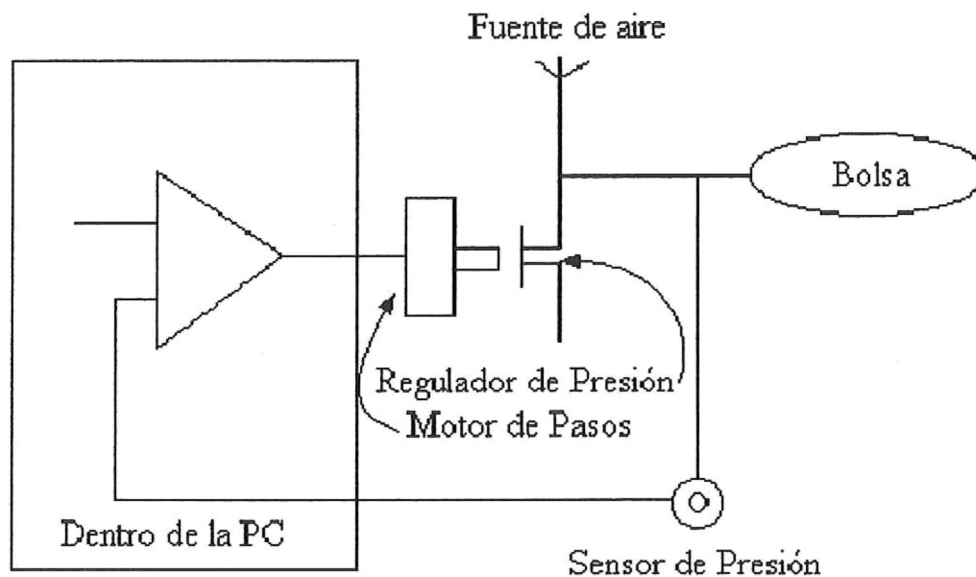


Figura 5.1. Diagrama a bloques del lazo de control de presión.

Se necesita controlar un regulador de presión (acoplado a un motor de pasos) el cual inyecta un flujo de aire en cada uno de los actuadores. Este regulador de presión actúa de manera que permite el paso controlado de un flujo de aire hacia los actuadores, desechando el aire no utilizado. Esta presión es medida por un sensor, el cual manda la lectura directamente a la computadora que cierra el lazo de control.

Para definir la precisión con la que deberá ser leída la presión es necesario saber el peso que carga cada una de las bolsas. Esta condición se vio en la sección 4.3, cuando se calculó el peso que debería cargar cada punto duro. El peso que debe de cargar cada una de las 18 bolsas es

$$w_b \approx \frac{1960\text{kg}}{18} = 108.88\text{kg} . \quad (5.1)$$

Así, utilizando la Ec [5.1] se obtiene que la presión que cada una de estas bolsas deberá mantener para soportar el espejo en el cenit será

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} \approx 1.809\text{psi} , \quad (5.2)$$

donde A es el área de la bolsa. La presión varía cosenoidalmente con el ángulo cenital, por lo que se propuso controlar la presión de 0 a 3 psi utilizando la precisión de un convertidor analógico digital de 8 bits para la lectura del sensor de presión. Un convertidor de estas características tiene una graduación de 256 escalones, lo cual nos da una precisión de 0.012 psi, que es suficiente para mantener la meta deseada del 1% de precisión.

5.1.2 Lazo de Posición

El lazo de posición mide el peso con celdas de carga, del espejo en los tres puntos duros, y decide como cambiar la presión en cada uno de los actuadores, siempre tratando de mantener 13 kg en cada uno de los puntos duros en la posición del cenit. Este lazo (Figura 5.2) actúa como un lazo externo a los 18 lazos de presión controlándolos

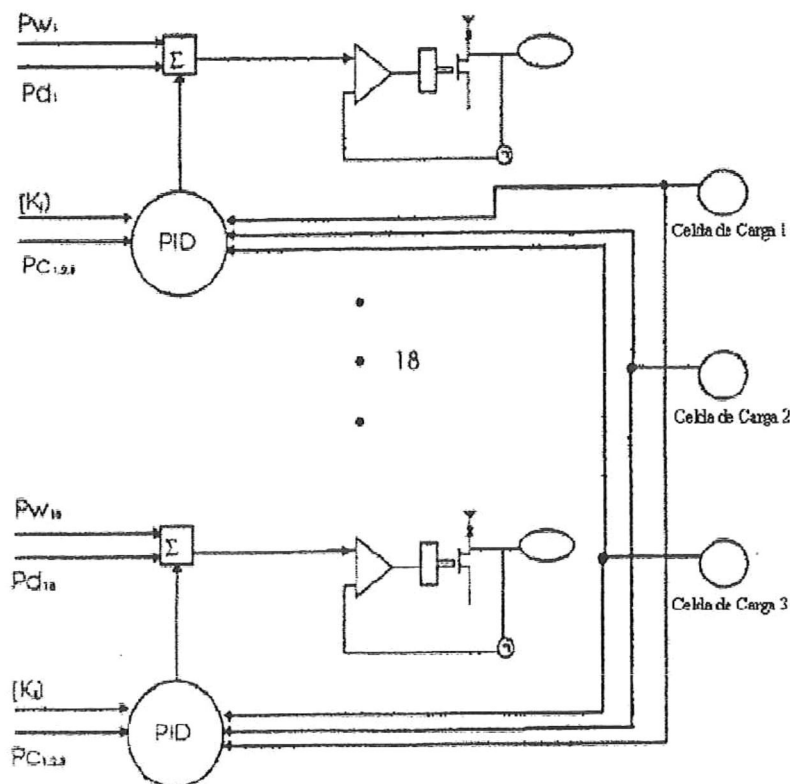


Figura 5.2. Diagrama de bloques del lazo de posición.

Este control sobre el lazo de posición, se realiza a través de una matriz de propagación y por un algoritmo proporcional-integral-derivativo, PID.

5.2 Circuitos Electrónicos de Control

5.2.1 Sensores de Presión

La electrónica que permite al sensor de presión generar una salida de 0 a 5 voltios, que es el rango de voltaje de los convertidores analógico digital, se presenta en la Figura 5.3.

El sensor de presión fabricado por Lucas Nova Sensor, se representa en el diagrama mediante un puente de Wheatstone que entrega una salida diferencial, con una no linealidad de 0.05%. Los elementos de sensado consisten en materiales semiconductores depositados en un miembro firmemente sujetado. Estos materiales se conectan eléctricamente como un puente resistivo, el cual está balanceado cuando no hay presión alguna aplicada sobre el sensor.

El circuito de amplificación está calibrado por un voltaje de desbalance el cual es alimentado por + 250 mV y - 250 mV, el circuito es terminado con un diodo zener de manera que si tenemos un voltaje de salida superior a 5.1 voltios, el diodo conduce, no permitiendo pasar más voltaje, protegiendo así la electrónica de conversión.

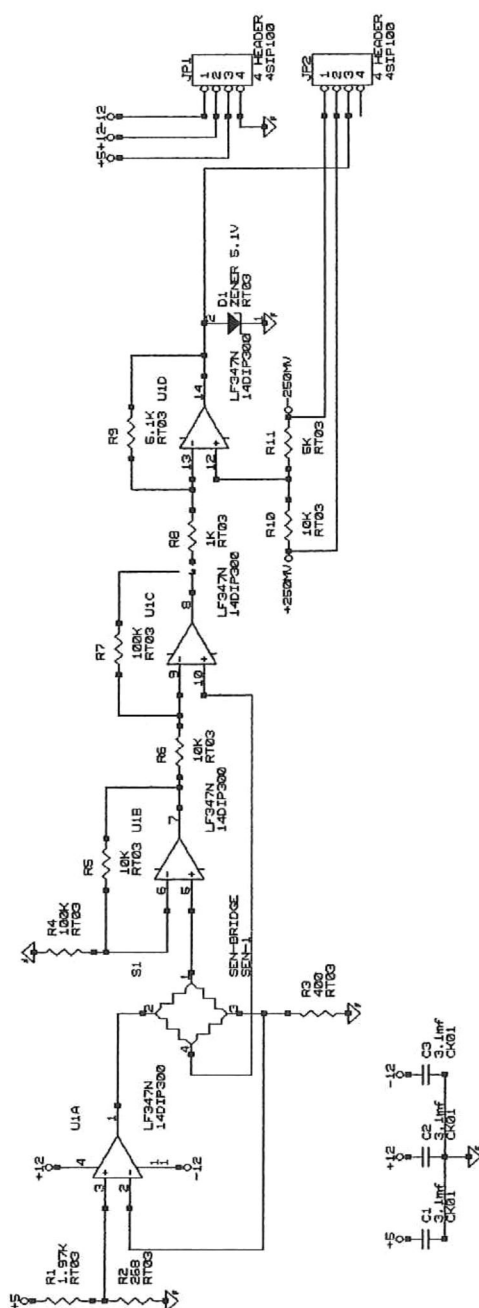


Figura 5.3. Diagrama electrónico de un sensor de presión, el primer amplificador operacional actúa como regulador de voltaje para el sensor de presión. Dos más de éstos sirven para la etapa diferencial del sensor y el tercero da la amplificación necesaria para producir una salida entre 0 y 5 voltios, para una presión de 0 a 3 psi.

Uno de los problemas a resolver fue la calibración del sensor de presión, para esto se utilizó el programa que se presenta en el Apéndice A. Para realizar esta calibración se utilizó la misma electrónica y protocolo de comunicación con el puerto paralelo, además de utilizar un graficador de presión en tiempo real. En esta calibración se utilizó un regulador de presión como el que se describe en la sección 5.2.5 y una bolsa de aire a la que se agregaba un peso de hasta 40 kg de peso, además se utilizaron dos manómetros de referencia en paralelo con el sensor de presión para la calibración. Se procedió a agregar distintos pesos a la bolsa, registrando la presión medida por el manómetro de referencia los voltajes de salida del circuito que estaba calibrando.

5.2.2 Celdas de Carga

La celda de carga utilizada fue la JP1000 de "Data Instruments" la cual es capaz de manejar un intervalo de 0 a 1000 libras. Estas celdas tienen una resolución muy fina, excelentes repetitibilidad, linealidad, y compensación por temperatura. La celda de carga traduce los cambios en fuerza o peso en voltaje. Los elementos de censado consisten en materiales semiconductores depositados en un miembro firmemente sujetado. Estos materiales están conectados en forma de puente de Wheatstone el cual da una salida nula cuando no hay fuerza alguna aplicada a la celda.

Cuando se aplica una fuerza a la celda, el material semiconductor cambia su resistencia dando como resultando en un desbalanceo del mismo puente proporcional a la fuerza. Si un voltaje se aplica a través de esquinas opuestas del puente, voltajes de salida aparecen en las otras dos esquinas. Este voltaje es proporcional al desbalance del puente resistivo, así como a la fuerza aplicada. Las celdas están construidas de tal manera que tanto la tensión y la compresión pueden ser medidas.

El diagrama electrónico para leer estas celdas se muestra en la Figura 5.4 que se muestra a continuación.

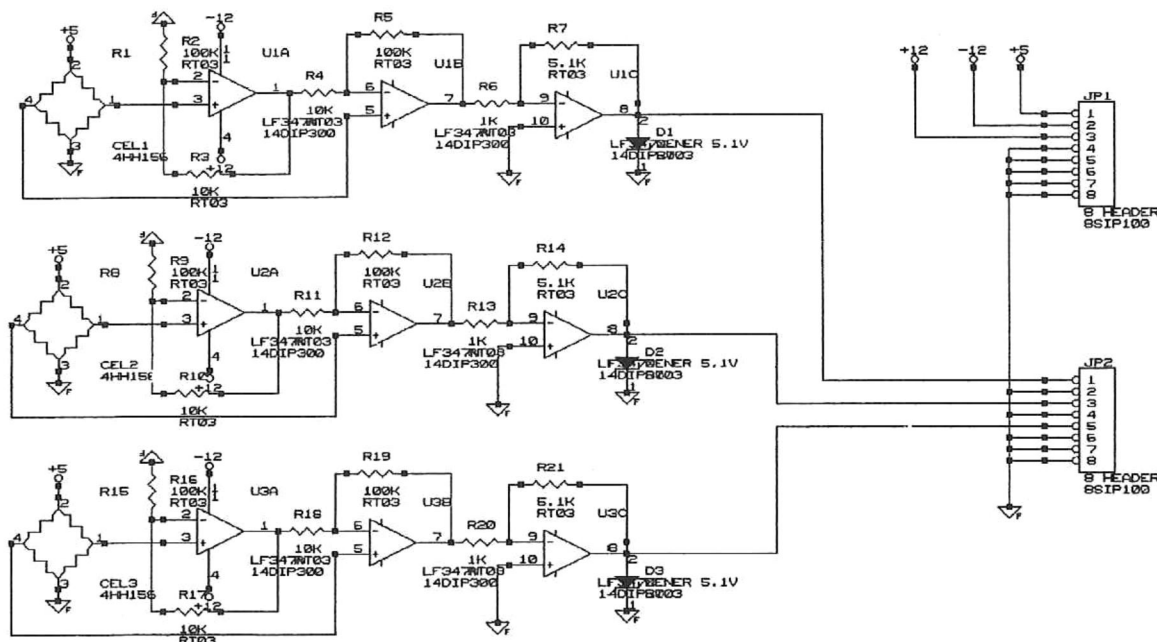


Figura 5.4. En este diagrama se puede apreciar las 3 celdas de carga enumeradas de arriba hacia abajo, las celdas son alimentadas en sus extremos por 0 y 5 voltios, se utilizan dos amplificadores operacionales en su etapa diferencial y un último amplificador para entregar una salida en el intervalo de 0 a 5 voltios, cada una cuenta con un diodo zener con rompimiento a 5.1 voltios.

Al igual que los sensores de presión, uno de los problemas fue la calibración. La calibración se hizo con masas de 1kg de peso, poniendo incrementos de peso de hasta 10 kg. Las celdas finalmente quedaron calibradas de 0 a 50 kg, de manera que la precisión con la que se mide el peso es de 0.195 kg.

5.2.3 Inclinómetro

El inclinómetro es una parte esencial del programa de deformaciones, ya que permite conocer el coseno del ángulo de inclinación del espejo.

Se utilizó el inclinómetro neumático original hecho por Boller and Chivens. Este inclinómetro tiene una salida de 0 a 1 psi, por lo que sólo se tuvo que ajustar la ganancia de los circuitos del diseño original de los sensores de presión (Figura 5.3), de esta manera sólo hubo que añadir un sensor más a los 18 ya existentes. Así, la electrónica es muy similar dando una precisión de 0.0039 psi en el coseno del ángulo. La señal de este inclinómetro entra en la pata 5 del convertidor analógico digital de la Figura 5.6.

5.2.4 Tarjeta Analógica a Digital

En el diseño original que se alambró en prototipo, los 18 sensores de presión y las 3 celdas de carga van incluidas en una tarjeta que sirve de interfaz entre la electrónica analógica y la electrónica digital por lo que la llamaremos tarjeta analógica a digital. Esta tarjeta recibe la de orden de lectura y regresa la presión en cada una de las bolsas y la carga de cada una de las celdas, así como el ángulo de inclinación del telescopio.

La primera parte que describe la electrónica analógica de la tarjeta, se puede ver en la Figura 5.5, la represente así en el diagrama electrónico para facilitar su lectura ya que en el prototipo de enrollado todo va sobre la misma tarjeta.

Los amplificadores operacionales LM1458N que se muestra en la Figura 5.5, sirven para alimentar con 250 mV y -250 mV los 18 sensores de presión y el inclinómetro, ya que sirven para controlar el desbalance de cada uno de los sensores, como se muestra en la Figura 5.3.

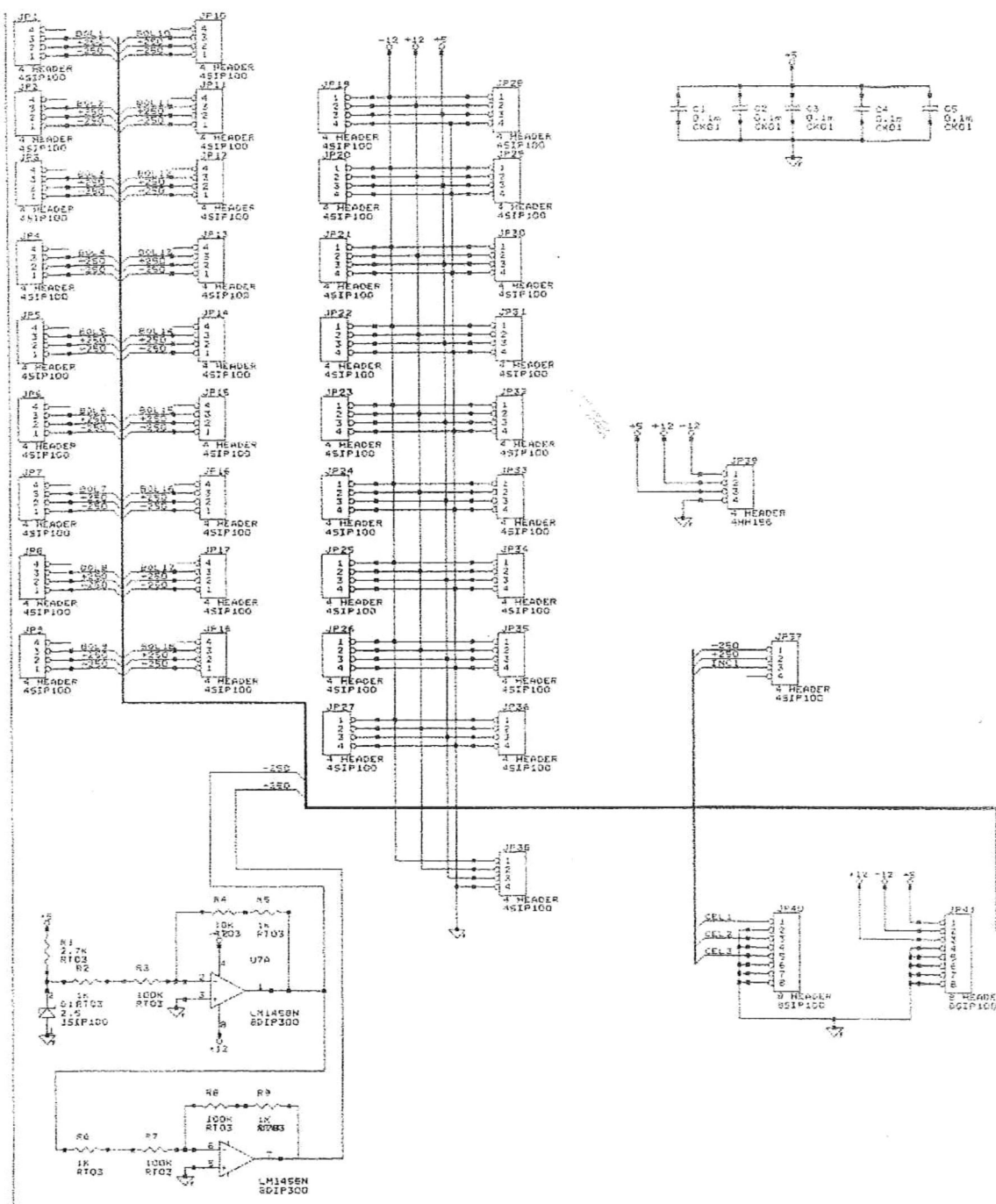


Figura 5.5. Primera parte de la tarjeta, electrónica analógica.

En la Figura 5.6, se muestra la parte lógica de esta tarjeta. El circuito integrado 74193, divide la frecuencia de 10 MHz del oscilador para entregar una frecuencia de 625 kHz a los 3 convertidores analógico digital, frecuencia necesaria para realizar la conversión de la señal analógica. Los convertidores marcados como U3, U4 y U5, realizan la conversión de la señal de 6 bolsas y la de una celda de carga, el convertidor U3, convierte además al inclinómetro neumático.

La orden de conversión se recibe a través del conector del cable listón (por la pata 18), esta señal de inicio llega a los tres convertidores simultáneamente haciendo que los tres conviertan su señal al mismo tiempo; previamente es escogido el sensor que deberá ser convertido mediante tres bits por las patas 15, 16 y 17 del mismo conector, por medio del circuito electrónico 74LS138 se escoge al convertidor que pasara los 8 bits hacia el ducto de datos del cable listón, por las patas 3 a la 10 del mencionado conector.

De esta manera tenemos ya los datos disponibles para ser leídos por la computadora, a través del cable listón a la tarjeta que se describe en la siguiente sección.

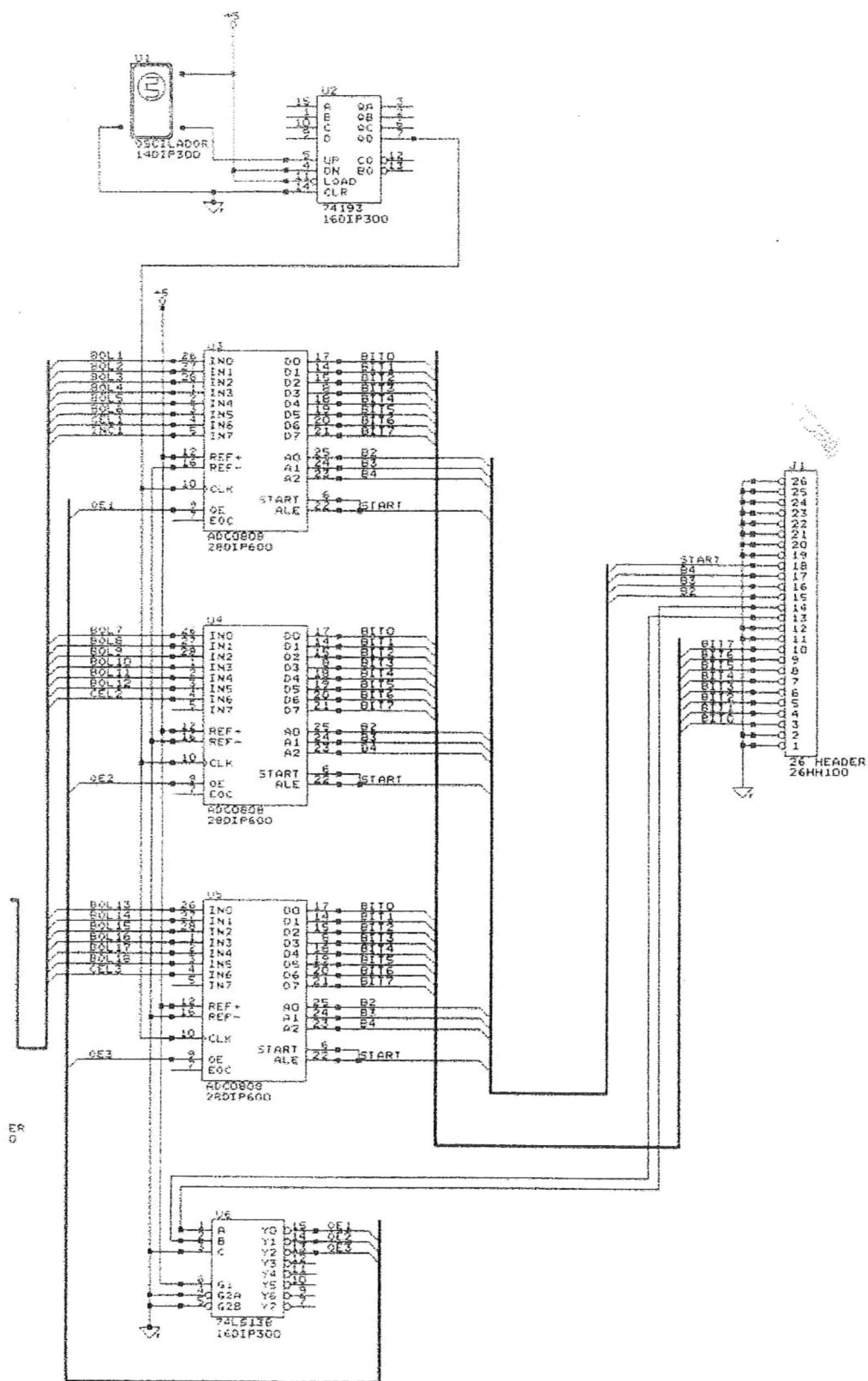


Figura 5.6. Segunda parte de la tarjeta, electrónica lógica.

5.2.5 Reguladores de Presión

Los reguladores de presión Airtrol modelo V-4104 utilizados, son parecidos a válvulas que se abren o cierran con el mando de un vástago giratorio dejando pasar parte del flujo de aire hacia las bolsas y desechando el flujo no utilizado. Los reguladores están acoplados a motores de pasos para girar mecánicamente estas válvulas. Estos motores sólo necesitan recibir dos líneas de control desde la computadora (una de pulsos y otra de dirección) por lo que se controlan muy fácilmente con 0 o 5 V, de tal forma que sólo hay que utilizar dos cables desde la computadora por cada uno de estos reguladores, además de la alimentación de 12 y 5 V para cada uno de los reguladores. En la Figura 5.7 se muestra la tarjeta para la conexión de los 18 reguladores de presión.

presión.

5.2.6 El Ducto de Datos

Una vez que se tienen las señales de las 18 bolsas de aire y las 3 celdas de carga, así como la del inclinómetro digitalizadas, es necesario una tarjeta de interfaz con la computadora, esta tarjeta deberá ser capaz de leer los datos enviados por los sensores de presión, celdas de carga e inclinómetro para su control. Además de lo anterior esta tarjeta deberá ser capaz de manejar los 18 reguladores de presión mencionados en la sección anterior.

El diseño original escribía y leía por la dirección 300H, además de hacer algunas otras funciones, que para esta aplicación fueron eliminadas. Este diseño fue de gran ayuda puesto que la dirección 300H la utilice para leer y escribir datos, pero además utilicé las direcciones 301H a la 305H (dentro de las modificaciones del diseño) para mover los reguladores, y la 305H para iniciar la conversión en los convertidores analógico digital, y escoger el sensor, celda o inclinómetro a leer. El diagrama electrónico se muestra en las Figuras 5.8 y 5.9.

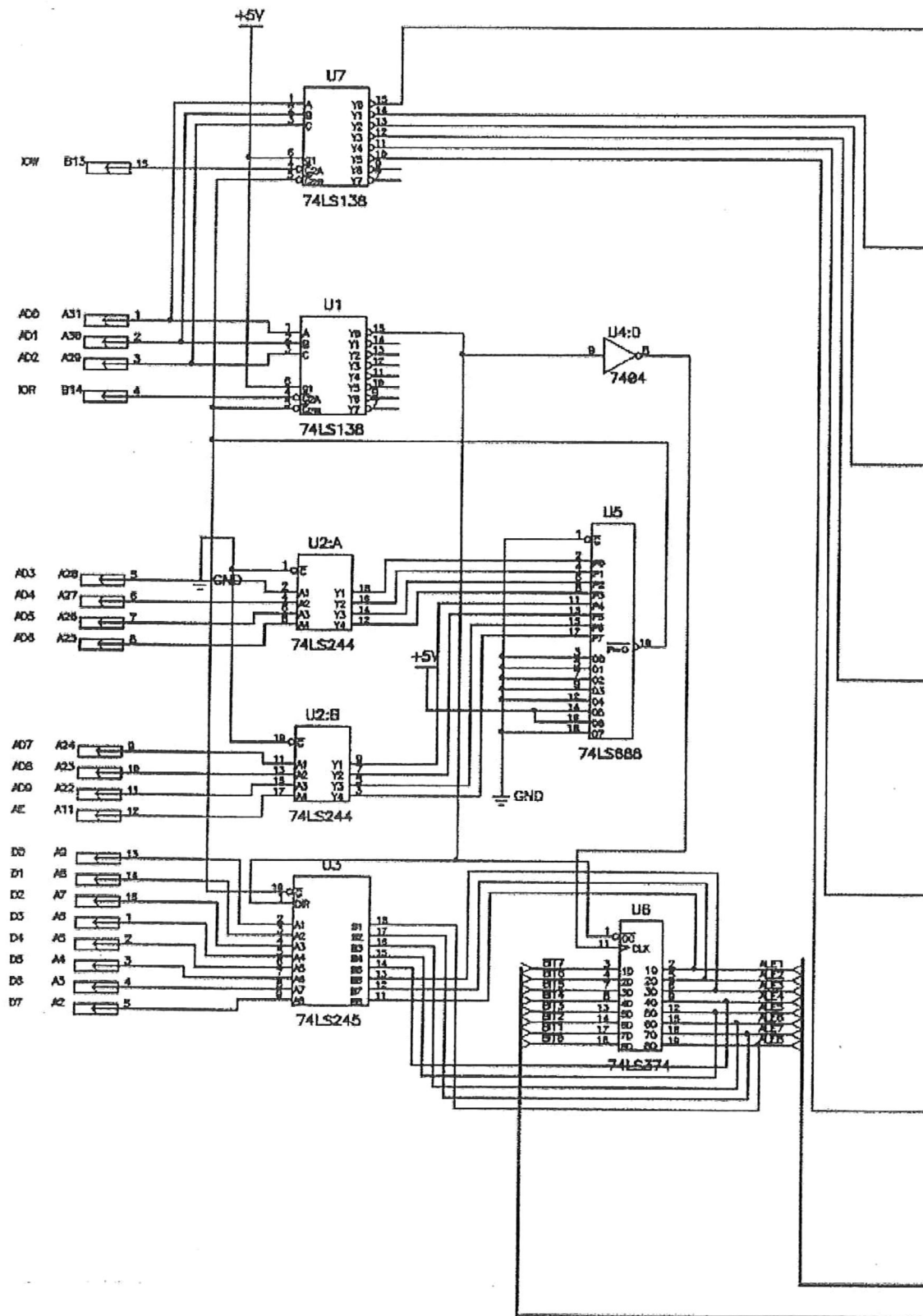


Figura 5.8. Diseño original, electrónica de comparación de dirección, lectura y escritura.

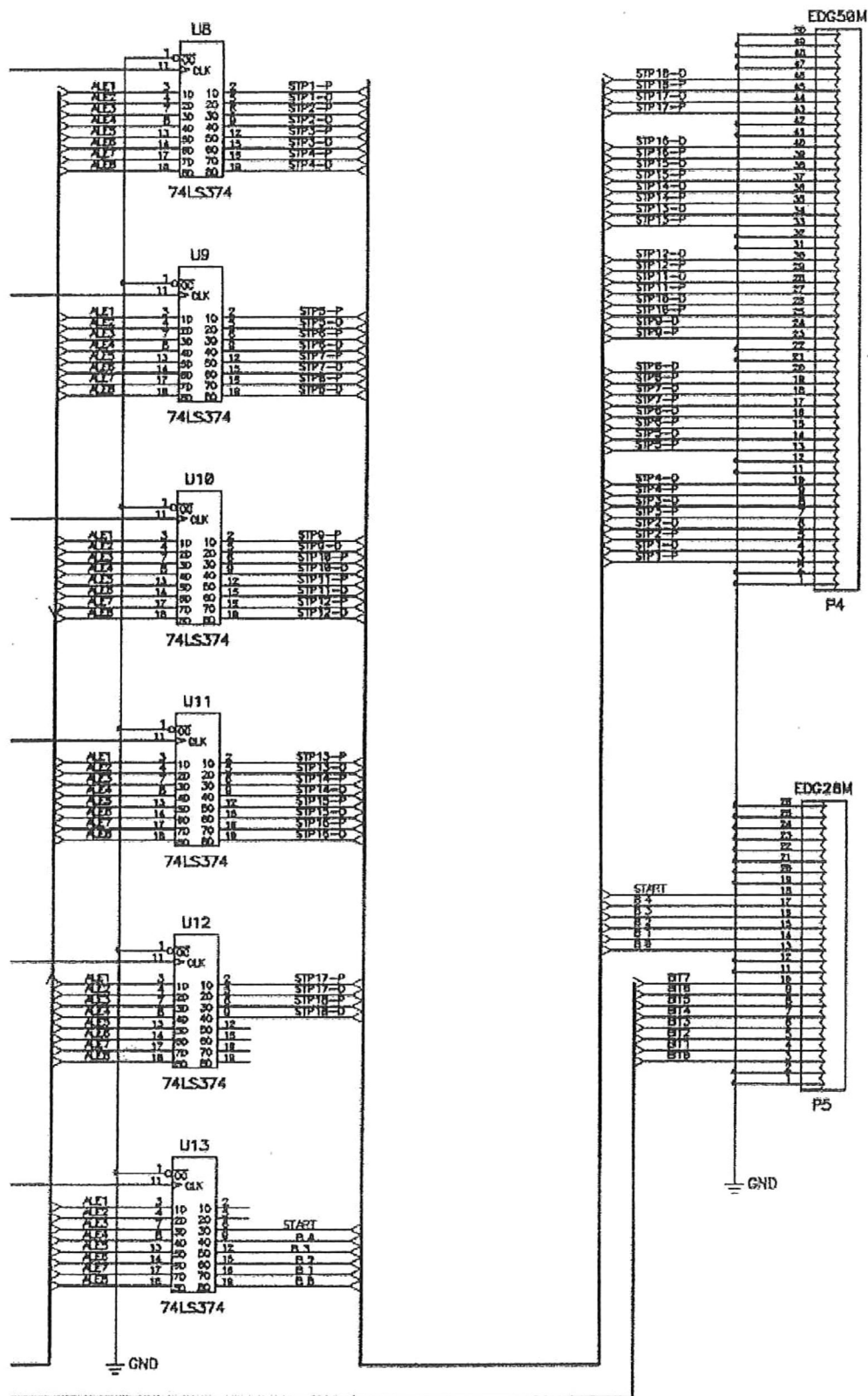


Figura 5.9. Segunda parte, escritura y lectura direcciones 300H a 305H.

El programa que interactura con esta tarjeta se encuentra descrito en el Apéndice B. El programa envía a esta tarjeta 8 bits de datos en paralelo por el ducto por medio del circuito U3, 74LS245, el cual también sirve para leer los 8 bits de entrada que vienen de la tarjeta analógico a digital descrita en la sección 5.2.4.

Una vez que los 8 bits son comparados por el circuito 74LS688 el cual recibe a su vez esos 8 bits del circuito U2A y U2B, y una vez que el circuito U1, ha recibido la señal de lectura y escritura, se pasa a leer o escribir con el circuito U6. Si es lectura entonces se manda una señal de lectura por la dirección 300H, la cual recibe el circuito U1 y manda al circuito U6, dejando pasar los datos que vienen del conector de cable listón, marcado en el diagrama como P5.

Si se trata de una escritura, entonces, dependiendo de que dirección haya sido escogida, ya sea la 300H a la 305H, estas direcciones son escogidas desde la programación, y son procesadas por el circuito U7, 74LS138, el cual se encarga de escoger los circuitos relacionados: U8 con la dirección 300H, U9 con la dirección 301H, U10 con la dirección 302H, U11 con la dirección 303H, U12 con la dirección 304H y por último, U13 con la dirección de escritura 305H. Esta última es de gran importancia para la lectura de la tarjeta de sensores, esto debido a que con la dirección 305H se inicia la conversión de los sensores, escogiendo previamente que sensor de que convertidor será leído por la dirección 300H.

El circuito U8 manda las señales a los motores de los reguladores de presión del 1 al 4, el circuito U9 manda las señales a los motores del 5 al 8, el circuito U10 manda las señales a los motores del 9 al 12, el circuito U11 manda las señales a los motores del 13 al 16, el circuito U12 manda las señales a los motores 17 y 18. Esto se hace a través del conector de cable listón marcado en el diagrama como P4, que se conecta con la tarjeta mencionada en la sección anterior.

6. Instalación en el Telescopio y Resultados

La temporada de ingeniería comenzó con la aluminización del espejo primario. Mientras esta etapa se llevaba a cabo se probaron las bolsas de aire por el departamento de mecánica de precisión, con una carga aproximada de 40 kg monitoreando que no hubiese fuga alguna. El equipo de mecánicos de precisión se encargó de perforar la celda para ubicar las bolsas de aire, dentro de estas tareas también hicieron las perforaciones y los arreglos necesarios para sujetar las celdas de carga.

Se añadió un módulo extra a la tarjeta de sensores para censar el inclinómetro neumático. El programa que se describe en el Apéndice B, se utilizó para probar el funcionamiento de los reguladores de presión, medir el ruido y ajustar el desbalance de los sensores de presión.

La configuración final de la disposición de cada tarjeta, así como de los reguladores de presión se puede observar en la Figura 6.1. Se utilizaron dos fuentes de alimentación: una alimenta la electrónica digital, los sensores de presión y celdas de carga; otra alimenta los reguladores de presión.

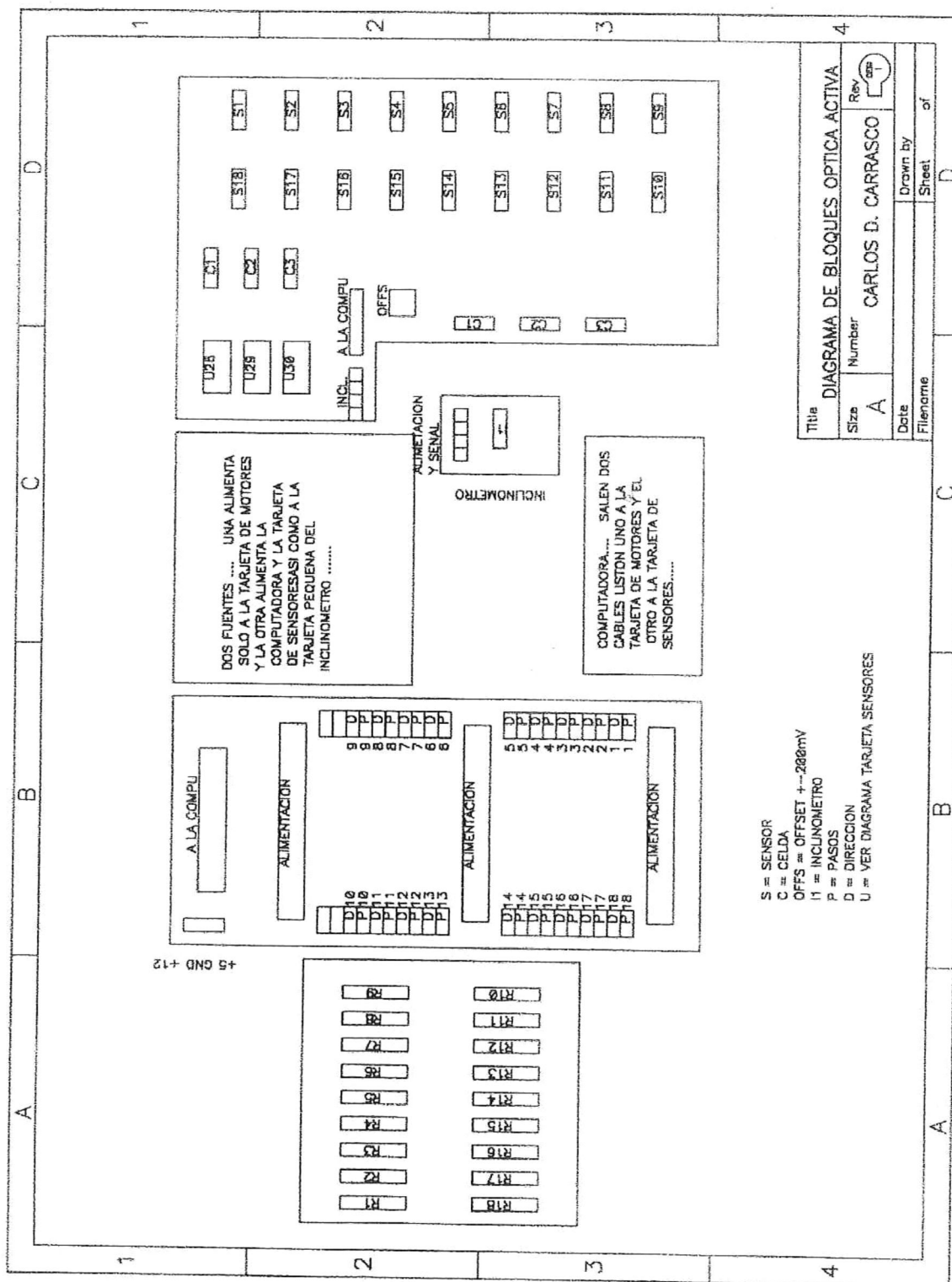


Figura 6.1. Configuración final de las tarjetas utilizadas y los reguladores de presión.

La Figura 6.1 muestra como se encuentran ubicadas todas las tarjetas descritas en el Capítulo 5, además de la computadora PC-486 en la que se instaló la tarjeta del ducto de datos. La instalación de esta estructura se hizo en la parte norte de la platina del telescopio como se muestra en la Figura 6.2. En esta figura el teclado cubre parcialmente la tarjeta que contiene a los sensores de presión, celdas de carga y el inclinómetro.

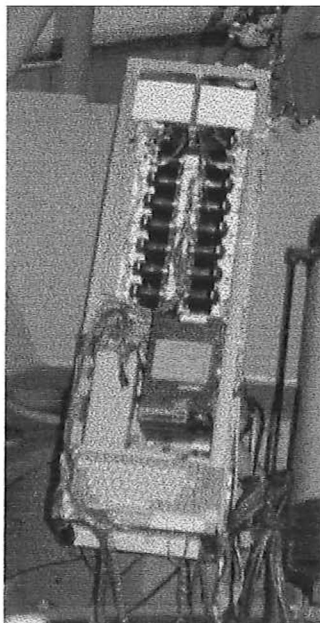


Figura 6.2. Instalación final de la electrónica en la platina del telescopio de 2.12m, En esta fotografía se aprecia que el teclado va pegado a la estructura, tapando la electrónica de control. En la parte superior izquierda del teclado se aprecia la computadora PC-486, utilizada para el control. El monitor se encuentra en el piso del telescopio. Las fuentes de alimentación se aprecian en la parte superior derecha del teclado y más arriba los 18 reguladores de presión.

Al término de la temporada que duró aproximadamente 3 semanas, quedó instalada satisfactoriamente la electrónica, obteniendo un funcionamiento óptimo, ya que se pudo utilizar el sistema sin contratiempo alguno al término de la primera semana, pudiendo obtenerse a continuación las matrices de deformación (Salas et al. 1997). Además el sistema pudo manejar el problema del control del algoritmo PID (Carrillo 1997).

El resultado arrojado por estas pruebas se puede apreciar en la Figura 6.3, donde se presenta la diferencia de calidad de imagen antes y después de la corrección. Se puede observar que antes de la corrección había 3 picos debidos a las aberraciones descritas en el Capítulo 3, (Baldwi después de la corrección sólo uno. Además se logró el objetivo de obtener el 80% de la radiación en un radio de 0.5 segundos de arco, con lo cual se cumplieron las expectativas.

Este proyecto dejó algo muy bueno que decir de la tecnología que se desarrolla actualmente en México, ya que en otros países se había intentado hacer algo similar sin conseguir ningún resultado favorable (Baldwin et al., 1992).

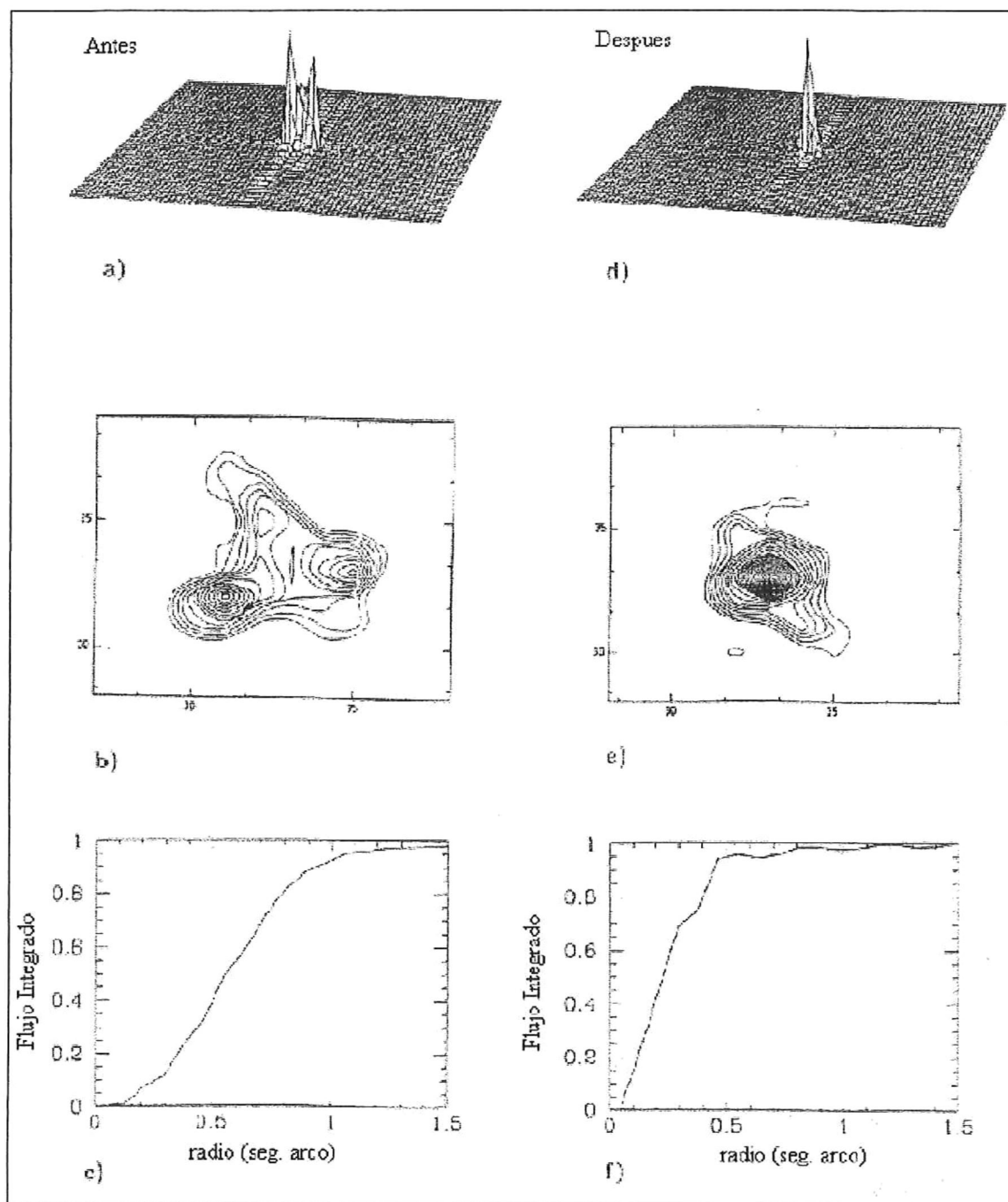


Figura 6.3. Calidad de imagen en el 2.12m, antes y después de la corrección.

En Noviembre de 1995, fueron obtenidas imágenes de 0.7 segundos de arco, reportadas por M. Tapia (Salas et al., 1997). La calidad de la imagen es ejemplificada por una imagen a 2 micrometros de una región ultra compacta HII, G173.7, obtenida con la camara infrarroja CAMILA, en la configuración focal $f/13.5$ (ver Figura 6.4).

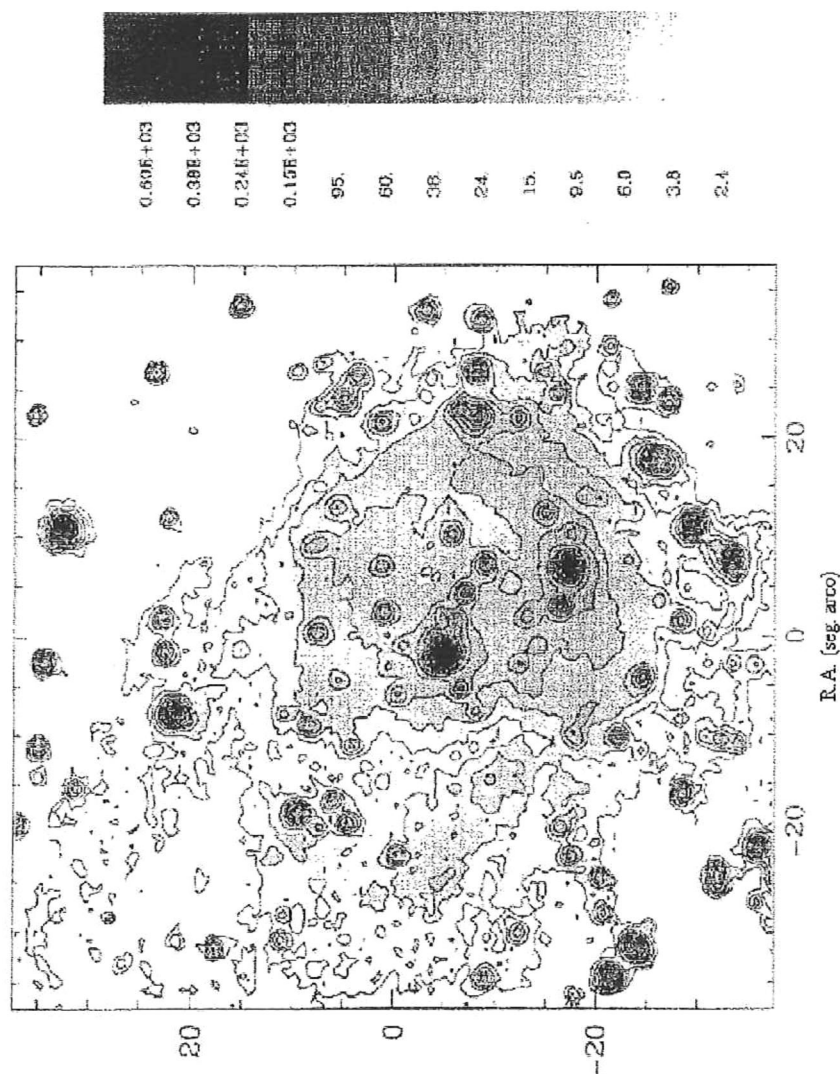


Figura 6.4. Imágenes de 0.7 segundos de arco, obtenidas con la corrección

Referencias

Arnold L. 1996. "Uniform Load and Actuator Influence Functions of a Thin or Thick Annular Mirror. Application to Active Mirror Suport Optimization", Appl. Opt. 35, 1095.

Baldwin J., Pérez G., Gregory B., Weller W., Wilson R., and Noethe L. 1992. "Retrofitting new thechnology to an old telescope," in ESO Conference on Progress in Telescope and Instrumentation Technologies (European Southern Observatory, Garching, Germany), p. 247.

Born M., & Wolf E. 1975. Principles of optics, 6th ed., Pergamon, Oxford, Cap. 8, pag. 370, Cap. 9, pag. 464.

Carrillo M. 1997. "Programación del control activo del telescopio de 2m de San Pedro Mártir", Memorias de Servicio Social, U.A.B.C. Ensenada B.C.

Cordero A., Luna E., Zárate S., & Harris O. 1995. "Evaluación de la calidad de la imagen del telescopio de 2.1-m.," Rep. Tec. 95-02, Instituto de Astronomía, UNAM Impreso, Ciudad de México, D.F.

De la Herrán 1981. "The Mexican 2.12-m telescope for the National Astronomical Observatory at SPM, BC, México," in Symposium on Recent Advances in Observational Astronomy, UNAM Press, México City, p. 133.

Hearn E. J. 1985. Mechanics of Materials, 2nd Edition, Volumen 1 y 2, "International Series on Materials Science and Technology, Volume 19".

Nelson J. E., Lubliner J., & Mast Terry S., 1982. Telescope Mirror Suport Plate, 212, SPIE Vol 332, Advanced Technology Optical Telescopes.

Noll R. J. 1975. J. Opt. Soc. Am., 66, 207.

Roddier C., Graves J. E., Northcott M. J., & Roddier F. 1994. "Testing optical telescopes from defocused stellar images," in *Advanced Technology Optical Telescopes V*, L. M. Stepp, ed., Proc. SPIE 2199, 1172.

Salas L. y Pedrayes M. 1992 "Calidad de la imagen de un telescopio con espejo primario deformable y soporte tipo NTT." Rep. Tec. #110, Instituto de Astronomía, UNAM, Ciudad de México, D.F.

Salas L., Gutiérrez L., Pedrayes M., Valdez J., Carrasco C. Carrillo M., García B., Luna E., Ruiz E., Cuevas S., Iriarte A., Cordero A., Harris O., Sohn E., & Martínez L. 1997. "Active primary mirror support for the 2.1-m telescope at the San Pedro Mártir Observatory" *Applied Optics*, Vol. 36, No. 16. p. 3708

Willson R. N., Fraza F., & Noethe L. 1987. Active Optics, A system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes. *Journal of Modern Optics*, Vol. 34, No. 4, p. 485.

Willson R.N., Franza F., Noethe L., Andreoni G. 1991. *J. Mod. Optics*, 38, 219.

Apéndices

Apéndice A

Programación de Sensores

Definición de bibliotecas de C++ para iniciar la programación.

```
#include <dos.h>
#include <iostream.h>
#include <conio.h>
#include <grafica.cpp>
#include <initgraf.h>
#include <permatli.h>
#include <tempfun.cpp>
#include <grafder.h>
/* Inicialización de objetos de pantalla y mouse. */
InitGraf Aquimero;
mouseobj mouse;

/* Declaración de Subrutinas.*/
void presion();
void letreros();
void motor_mas();
void motor_menos();
int lee_convertidor();

/* Declaración de variables globales para el resto del programa. */
int inicio;
float valor;
Graphics G; /* Definición de constantes globales. */
#define constante 0
#define psi 0.01953125 /* Inicialización de menú principal. */
void main() { /* Declaración de variables locales. */
    int x,y,ya=0,pasos=0,cuantos=1;
    float diferencia=0,conta=0,p_deseada=0;
    mouse.show();
    outportb(0x378,2); /* pone en alto el START del convertidor */
    inicio = lee_convertidor();
    letreros(); /* Inicializa ambiente gráfico, cajas, botones, y pantalla de despliegue */
    CajaCTex Quit(550,450," Quit");
    Quit.DrawBox(BLANCO);
```



```

CajaCTex Mas(300,335," Mas ");
Mas.DrawBox(CAFE);
CajaCTex Menos(360,335," Menos");
Menos.DrawBox(CAFE);
CajaCTex Pres(350,450," Presion Deseada");
Pres.DrawBox(VERDE);
CajaCTex Motor(100,450," Movimiento de Motor");
Motor.DrawBox(VERDE);
CajaCTex Paso(5,450," 1 PASO");
Paso.DrawBox(VERDE);
CajaCTex Pausa(550,420," Pausa");
Pausa.DrawBox(VERDE);
CajaCTex Stop(100,410," STOP");
Stop.DrawBox(ROJO);
mouse.hide();      /* Animación de despliegue de presión en tiempo real. */
GraficaAnim<double> Primera(0,-1,10,5,310,50,630,330,NEGRO);
Primera.Ejes("tiempo","Presión");
mouse.show();      /* Inicia ciclo para verificación de selección de botones. */
while(!(ya==21)) { ya=0;
  if(mouse.teloapachurre(IZQUIERDO)){
    mouse.getcoords(x,y);
    if(Quit.EnCaja(x,y)){ya=21;}
    if(Mas.EnCaja(x,y)){
      for(int ma=0; ma<cuantos; ma++){
        motor_mas();
        if(mouse.teloapachurre(IZQUIERDO)){ mouse.getcoords(x,y);
          if(Stop.EnCaja(x,y)){break;}      }
        pasos++;
        G.PintaNumE(NEGRO,BLANCO,200,200, pasos);      }
    if(Menos.EnCaja(x,y)){
      for(int me=0; me<cuantos; me++){
        motor_menos();
        if(mouse.teloapachurre(IZQUIERDO)){
          mouse.getcoords(x,y);
          if(Stop.EnCaja(x,y)){break;}      }
        pasos--;
        G.PintaNumE(NEGRO,BLANCO,200,200, pasos);      }
    if(Pres.EnCaja(x,y)){
      G.PutString(BLANCO,20,400,"Dame la presión deseada ");
      p_deseada=G.GetNum(300,400);
      G.PutString(NEGRO,20,400,"Dame la presión deseada ");
      G.PintaNum(NEGRO,NEGRO,300,400, p_deseada);
      G.PutString(BLANCO,20,300,"La presión deseada es ");
      G.PintaNum(NEGRO,BLANCO,230,300, p_deseada);    }
  }
}

```

```

if(Motor.EnCaja(x,y)){
    G.PutString(BLANCO,20,400,"Dame el numero de Pasos ");
    cuantos=G.GetNum(300,400);
    G.PutString(NEGRO,20,400,"Dame el numero de Pasos ");
    G.PintaNum(NEGRO,NEGRO,300,400, cuantos);
    G.PutString(BLANCO,20,270,"Los Pasos Deseados son ");
    G.PintaNumE(NEGRO,BLANCO,230,270, cuantos);    }    }
if(Paso.EnCaja(x,y)){    cuantos=1;
    G.PutString(BLANCO,20,270,"Los Pasos Deseados son ");
    G.PintaNumE(NEGRO,BLANCO,230,270, cuantos);    }
if(Pausa.EnCaja(x,y)){    while(!(ya==7)){
    if(mouse.teloapachurre(IZQUIERDO)){
        mouse.getcoords(x,y);        ya=7;        }        }        }
presion();
diferencia=p_deseada;
if(fabs(diferencia-valor)<0.02){;}else{
if(valor<p_deseada){
    for(int mass=0; mass<10; mass++){    motor_mas();        }
    pasos+=10;
    G.PintaNumE(NEGRO,BLANCO,200,200, pasos);    }else{
    for(int menoss=0; menoss<10; menoss++){    motor_menos();        }
    pasos-=10;
    G.PintaNumE(NEGRO,BLANCO,200,200, pasos);    }    }
delay(10);
Primera.Punto (conta,valor);
conta+=.01; }}

```

/* Subrutina encargada de enviar pasos al regulador de presión así como de enviar la dirección, sea definida como más, la rotación derecha. */

```

void motor_mas(){
    outportb(0x378,0); delay(10);
    outportb(0x378,8); delay(10);}

```

/* Subrutina encargada de enviar pasos al regulador de presión así como de enviar la dirección, sea definida como menos, la rotación izquierda. */

```

void motor_menos(){
    outportb(0x378,4); delay(10);
    outportb(0x378,0xc); delay(10);}

```

/* Subrutina encargada de regresar el valor de presión, realizando la conversión de pasos del motor del regulador de presión, a psi. */

```

void presion(){ int a=0,b=0; int ese=0;
    ese = lee_convertidor();
    valor = ese * psi;
    G.PintaNum(NEGRO,ROJO,200,120,valor);

```

```

G.PintaNum(NEGRO,ROJO,200,170,(valor/0.14504));}
/* Subrutina encargada solamente de pintar los letreros que se despliegan en la pantalla
principal, ver figura x. */
void letreros(){
    G.PutString(AMARILLO,200,40,"Programa para medir presión");
    G.PutString(AZUL_C,20,120,"Presion en Psi ");
    G.PutString(AZUL_C,20,170,"Presion en kPa ");
    G.PutString(AZUL_C,20,200,"Pasos ");
    G.PutString(AZUL_C,20,350,"Controlador de Presión");}
/* Subrutina encargada de leer el convertidor analógico digital, enviando bits de
conversión, y recibiendo 8 bits de lectura por medio de la dirección 308H.*/
int lee_convertidor(){int a,b,este=0;
    outportb(0x378,0); //
    outportb(0x378,2); // inicia conversión      delay(1);
    outportb(0x378,3);
    a=inportb(0x379)&0xf0; // lee la parte alta
    outportb(0x378,2);
    b=inportb(0x379)&0xf0; // lee la parte baja
    if(a&0x80) a&=0x7f;
    else a|=0x80;
    if(b&0x80) b&=0x7f;
    else b|=0x80;
    este = a+(b>>4);
    return este;}

```

Apéndice B

Programación del Ducto de Datos.

Se describe la segunda versión del programa que sirve para la lectura de los 18 sensores de presión, 3 celdas de carga y 1 inclinómetro neumático. Cabe señalar que en la programación de esta segunda versión tuvo la ayuda de L. Gutiérrez, para enmascarar los 18 sensores.

Inicialización de bibliotecas para el uso, en el resto del programa.

```
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>
/* Declaración de una estructura bolsa para el enmascarado de direcciones de control a
cada sensor. */
typedef struct bolsa{ int mask,presion,offset,ganancia;
    long prom; };
/* Enmascarado de direcciones para la lectura de los 3 convertidores analógico digital en
paralelo, para leer los 18 sensores de presión. */
bolsa bolsas[18] =
{{0x0,0,19,53},{0x4,0,34,56},{0x8,0,17,53},{0xc,0,29,51},{0x10,0,21,52},
{0x14,0,32,52},{0x1,0,10,50},{0x5,0,14,52},{0x9,0,21,54},{0xd,0,23,54},
{0x11,0,22,51},{0x15,0,15,52},{0x2,0,15,53},{0x6,0,18,53},{0xa,0,24,52},
{0xe,0,21,52},{0x12,0,20,50},{0x16,0,25,50}};
/* Declaración de subrutinas. */
void motor_mas(int motor);
void motor_menos(int motor);
void main(void) /* Inicialización del programa principal. */
{
    int ch = 20, pasos = 0, j, cont = 0, motor=1;
    while(ch!=27) { /* Lectura de todos los canales de 3 en tres. */
        for(int i=0; i<6; i++) {
            outportb(0x305,bolsas[i].mask);
            outportb(0x305,(bolsas[i].mask)|0x20);
            outportb(0x305,bolsas[i].mask);
            delay(5);
            bolsas[i].presion=inportb(0x300)-bolsas[i].offset;
            outportb(0x305,(bolsas[i].mask)+1);
            bolsas[i+6].presion=inportb(0x300)-bolsas[i+6].offset;
            outportb(0x305,(bolsas[i].mask)+2);
            bolsas[i+12].presion=inportb(0x300)-bolsas[i+12].offset; }
        if(cont == 1) { /* Despligue de los valores de presión a pantalla. */
            for(i=0; i<18; i++) {
                printf("%ld, ",(bolsas[i].prom)/1);
```

```

        bolsas[i].prom=0;    }
    printf("\n");           cont = 0;    }
else {
    for(i=0; i<18; i++) bolsas[i].prom +=(long)bolsas[i].presion;
    cont++;
}
/* Una vez desplegados los valores de presión a pantalla revisar el teclado. */
delay(30);    ch = 20;
if(kbhit()) {    ch = getch();
/* Si se ha tecleado la letra "P" (positivo) pregunta cuantos pasos se tiene que mover el
motor, pregunta que motor hay que mover. Una vez hecho esto se procede a enviar al
programa a la subrutina de motor_mas. */
    if(ch == 'p') {
        printf("Cuantos pasos? ");
        if(scanf("%d",&pasos))    {
            printf("Que motor?"); if(scanf("%d", &motor))
            for(j=0;j<pasos;j++) motor_mas(motor); }
}
/* Si se ha tecleado la letra "N" (negativo) pregunta cuántos pasos se tiene que mover el
motor, pregunta que motor hay que mover. Una vez hecho esto se procede a enviar al
programa a la subrutina de motor_menos. */
    if(ch == 'n') {
        printf("Cuantos pasos? ");
        if(scanf("%d",&pasos))    {
            printf("Que motor?"); if(scanf("%d", &motor))
            for(j=0;j<pasos;j++) motor_menos(motor); }}}}

```

/* Una vez seleccionado el motor y el número de pasos, y dependiendo si se tecleo la letra "P" el programa es enviado a la siguiente subrutina, que es la encargada de mandar por medio del ducto de datos, el numero de ciclos y la dirección con la que se debe mover dicho motor. */

```

void motor_mas(int motor){
    switch(motor){
        case 1: outportb(0x300,128);    delay(5);
            outportb(0x300,0);    delay(5);    break;
        case 2: outportb(0x300,32);    delay(5);
            outportb(0x300,0);    delay(5);    break;
        case 3: outportb(0x300,8);    delay(5);
            outportb(0x300,0);    delay(5);    break;
        case 4: outportb(0x300,2);    delay(5);
            outportb(0x300,0);    delay(5);    break;
        case 5: outportb(0x301,128);    delay(5);
            outportb(0x301,0);    delay(5);    break;
        case 6: outportb(0x301,32);    delay(5);
            outportb(0x301,0);    delay(5);    break;
        case 7: outportb(0x301,8);    delay(5);

```

```

        outportb(0x301,0);        delay(5);        break;
case 8: outportb(0x301,2);        delay(5);
        outportb(0x301,0);        delay(5);        break;
case 9: outportb(0x302,128);      delay(5);
        outportb(0x302,0);        delay(5);        break;
case 10: outportb(0x302,32);      delay(5);
        outportb(0x302,0);        delay(5);        break;
case 11: outportb(0x302,8);       delay(5);
        outportb(0x302,0);        delay(5);        break;
case 12: outportb(0x302,2);       delay(5);
        outportb(0x302,0);        delay(5);        break;
case 13: outportb(0x303,128);     delay(5);
        outportb(0x303,0);        delay(5);        break;
case 14: outportb(0x303,32);      delay(5);
        outportb(0x303,0);        delay(5);        break;
case 15: outportb(0x303,8);       delay(5);
        outportb(0x303,0);        delay(5);        break;
case 16: outportb(0x303,2);       delay(5);
        outportb(0x303,0);        delay(5);        break;
case 17: outportb(0x304,128);     delay(5);
        outportb(0x304,0);        delay(5);        break;
case 18: outportb(0x304,32);      delay(5);
        outportb(0x304,0);        delay(5);        break;  }}

```

/* Una vez seleccionado el motor y el número de pasos, y dependiendo si se tecleo la letra "N" el programa es enviado a la siguiente subrutina, que es la encargada de mandar por medio del ducto de datos, el número de ciclos y la dirección con la que se debe mover dicho motor. */

```

void motor_menos(int motor){
    switch(motor){
        case 1: outportb(0x300,128+64); delay(5);
                outportb(0x300,64);      delay(5);        break;
        case 2: outportb(0x300,32+16);  delay(5);
                outportb(0x300,16);      delay(5);        break;
        case 3: outportb(0x300,8+4);     delay(5);
                outportb(0x300,4);       delay(5);        break;
        case 4: outportb(0x300,2+1);     delay(5);
                outportb(0x300,1);       delay(5);        break;
        case 5: outportb(0x301,128+64);  delay(5);
                outportb(0x301,64);      delay(5);        break;
        case 6: outportb(0x301,32+16);  delay(5);
                outportb(0x301,16);      delay(5);        break;
        case 7: outportb(0x301,8+4);     delay(5);

```

```

        outportb(0x301,4);           delay(5);           break;
case 8: outportb(0x301,2+1);         delay(5);
        outportb(0x301,1);           delay(5);           break;
case 9: outportb(0x302,128+64);      delay(5);
        outportb(0x302,64);          delay(5);           break;
case 10: outportb(0x302,32+16);       delay(5);
        outportb(0x302,16);          delay(5);           break;
case 11: outportb(0x302,8+4);         delay(5);
        outportb(0x302,4);           delay(5);           break;
case 12: outportb(0x302,2+1);         delay(5);
        outportb(0x302,1);           delay(5);           break;
case 13: outportb(0x303,128+64);      delay(5);
        outportb(0x303,64);          delay(5);           break;
case 14: outportb(0x303,32+16);       delay(5);
        outportb(0x303,16);          delay(5);           break;
case 15: outportb(0x303,8+4);         delay(5);
        outportb(0x303,4);           delay(5);           break;
case 16: outportb(0x303,2+1);         delay(5);
        outportb(0x303,1);           delay(5);           break;
case 17: outportb(0x304,128+64);      delay(5);
        outportb(0x304,64);          delay(5);           break;
case 18: outportb(0x304,32+16);       delay(5);
        outportb(0x304,16);          delay(5);           break;
}}

```