

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

SEDE LATACUNGA



CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA
AUTOMATIZACIÓN DEL POSICIONAMIENTO DE CÚPULA EN EL
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA ALAMEDA E
IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL”**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA ESPECIALIDAD INSTRUMENTACIÓN

GALLARDO BUSTILLOS IVÁN PATRICIO

Latacunga, Agosto 2008

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente documento fue totalmente elaborado por el señor IVÁN PATRICIO GALLARDO BUSTILLOS, bajo nuestra supervisión.

Latacunga, Agosto del 2008

Ing. José Bucheli A.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Marcelo Silva M.
CO – DIRECTOR DEL PROYECTO

AUTORIZACIÓN

Yo, IVÁN PATRICIO GALLARDO BUSTILLOS, en pleno uso de mis facultades, AUTORIZO a la ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO la publicación en la Biblioteca Virtual de la institución el proyecto de grado con el tema “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA ALAMEDA E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Agosto del 2008

Iván Patricio Gallardo Bustillos

AGRADECIMIENTO

Nunca se me habían imaginado las situaciones en particular apenas iniciando mi proyecto de tesis, el golpe tan penoso y aterrador de la vida que fue al principio en mi familia, por un considerable lapso de tiempo no tuve más remedio que hacer a un lado mi mente de cualquier cosa que no sea mi madre... En verdad ese sufrimiento puso una venda sobre mis ojos, paralizó mis sentidos y desconectó mi cerebro, me había convertido en un sujeto del dolor que por si fuera poco además me sentía como un animalito enjaulado al alejarme forzosamente de mi tierra natal. Considero que por aquella época mis ánimos estuvieron por los suelos, y lo aguantaba en silencio. Era innegable el padecer de mis padres, hermana, familiares, amigos y allegados, yo los veía y cada uno infundía dentro de sí una luz de esperanza, fue así que con la unión de aquellas buenas voluntades las cosas poco a poco fueron resarciéndose y empezó de nuevo a florecer la ilusión, misma que tal vez estuvo siempre allí dentro nuestro esperando emerger y revelarse.

El aliento incesante y el apoyo incondicional fueron el complemento para que esta historia de horror culmine con un final feliz, hasta ahora no se de dónde salió tanto carácter, tanta tenacidad y ganas de triunfar, creo que esas cualidades me las transmitió mi madre aún cuando entraba al quirófano en una operación de muy alto riesgo, me dijo que pensaba que todo iba a salir bien y así sucedió, ese fue uno de los momentos más emotivos de mi vida.

Si a alguien debo agradecer es al ser supremo por ponerme semejante prueba de vida, que aunque a todos los ubique alguna vez frente a situaciones como esta, no se tiene la seguridad de lo que le tocará vivir, de la cruz que deba cargar. En lo que respecta a agradecimiento entre los mortales distingo a mis padres y mi hermana por su amor y su compromiso de sacarme adelante, a mis familiares y amigos por llenar mi existencia con esa fraternidad e incondicionalidad, a mis maestros con los que perfeccioné cualidades, incrementé conocimientos y con los que se aprende lo más valioso que es la amistad.

DEDICATORIA

Esto va por ti y para ti Mami, Papi, Ery, para que el destino no vuelva a mancillarnos...

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	vi
------------------------	----

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE ASTRONOMÍA

1.1. ÓPTICA DEL TELESCOPIO	1
1.1.1 Lente convexa	1
1.1.2 Lente cóncava	2
1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE TELESCOPIOS	3
1.3. ELEMENTOS DE UN OBSERVATORIO ASTRONÓMICO	6
1.4. TIPOS DE TELESCOPIOS	11
1.5. MONTURAS Ó SOPORTES	13
1.5.1. Tipos de monturas	13
1.6. COORDENADAS CELESTIALES	15
1.6.1. Declinación	19
1.6.2. Ascensión recta	19
1.6.3. Comparativa virtual entre los sistemas de coordenadas celestiales	20
1.7. DOMOS Y SU PROPÓSITO	24
1.8. GEOMETRÍA DE DOMO	28
1.8.1. Determinación del azimut del domo	28
1.8.2. Sistemas de coordenadas	29
1.8.3. Desarrollo de un algoritmo para rotación sincronizada de domo a partir de ecuaciones	38
1.8.4. Caja de diálogo “Geometría”	39
1.9. SITUACIÓN GEOGRÁFICA	42
1.10. CLASES DE TIEMPO	47
1.11. DATOS QUE IDENTIFICAN A LOS ASTROS	50
1.12. SITUACIÓN ACTUAL DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA ALAMEDA	52
1.13. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE TELESCOPIOS EN SEGUIMIENTO DE ASTROS	55

1.13.1. Configuración de coordenadas de telescopio y alineación	55
1.13.2. Diagrama de bloques de un observatorio astronómico	57
1.14. INTERFACE GRÁFICA DE SOFTWARE VINCULADO A CONTROL DE TELESCOPIOS Y DOMO	60
1.15. ENLACES DE COMUNICACIÓN MÁS FRECUENTES ENTRE PC Y OBSERVATORIO.	64
1.16. COMANDOS MÁS COMUNES EN OPERACIÓN DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS	67
1.17. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD DE RASTREO.	69
1.18. SISTEMA DE ROTACIÓN DE DOMO	70
1.18.1. Cálculo de relación mecánica	72
1.18.2. Motores eléctricos utilizados en conjunto a reductores mecánicos	74
1.19. CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADECUADAS	74
1.20. PROCESO DE OBSERVACIÓN DE UN ASTRO	76
1.20.1. Estandarizaciones y problemas frecuentes	78
1.20.2. Hardware y software que demanda un proceso de observación 100% automatizado	80

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA Y CONTROL APLICADOS AL PROYECTO

2.1. PROCESO DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE CONTROL A LAZO CERRADO	85
2.1.1. Pasos de diseño.	85
2.2. REPRESENTACIÓN DE LA PLANTA	87
2.3. COMPENSADORES Ó CONTROLADORES	89
2.4. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	90
2.5. TIPOS DE CONTROLES	91
2.5.1. Función de transferencia de cada tipo de control.	91
2.5.2. Características de los controladores	93
2.6. LAZO DE CONTROL PROPORCIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVO (PID)	94
2.7. MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN EN CONTROLADORES	95
2.7.1. Métodos analíticos	97

2.7.2. Métodos experimentales	110
2.8. CRITERIOS DE ESTABILIDAD	114
2.8.1. Criterio de estabilidad de Routh	117
2.9. ARQUITECTURA DE MICROCONTROLADORES EN GENERAL	121
2.9.1. Diagrama general de un microcontrolador	124
2.9.2. Clasificación de los microcontroladores	126
2.9.3. Componentes básicos y avanzados	127
2.9.4. Lenguajes en microcontroladores	132
2.10. INTRODUCCIÓN A SERVOMECANISMOS	133
2.10.1. Definición de un servomecanismo básico	132
2.10.2. Componentes de un servomecanismo	135
2.10.3. El servomotor	135
2.11. VARIADORES DE FRECUENCIA	136
2.11.1. Principio de variación de velocidad en motores a.c. mediante variación de frecuencia	137
2.11.2. Variadores de frecuencia para manejo de motores de inducción a.c.	144
2.12. SENSORES APLICADOS AL PROYECTO	147
2.12.1. Sensores de posición	147
2.12.2. Sensores de proximidad	154
2.13. INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL Y SOFTWARE APLICADO	165
2.13.1. Definición de instrumento virtual	166
2.13.2. Hardware que trabaja en conjunto al software de instrumentación virtual	168
2.13.3. Entorno de software	170

CAPÍTULO III
ANÁLISIS Y DISEÑO

3.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	171
3.1.1. Análisis de requisitos en el observatorio	175
3.2. MODOS DE OPERACIÓN	177
3.3. ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS DEL SISTEMA	178
3.3.1. Descripción de hardware	180
3.3.2. Especificaciones de software	183

3.4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS	186
3.4.1. Establecimiento de posiciones iniciales en domo, montura y compuertas	187
3.4.2. Fases de una sesión de observación automatizada	191
3.4.3. Conversión entre coordenadas ecuatoriales a coordenadas alt - azimutales	192
3.4.4. Corrección de excentricidad respecto al eje de rotación de la montura	195
3.5. PARÁMETROS FÍSICOS DE LA ESTRUCTURA DE DOMO	199
3.5.1. Descripción de la estructura de domo	199
3.5.2. Establecimiento de parámetros físicos óptimos de operación	200
3.6. DISEÑO DE CONTROL	204
3.6.1. Modelado del sistema	205
3.6.2. Función de transferencia del sistema	207
3.6.3. Diagrama de bloques del sistema de control	208
3.6.4. Resultados de evaluación del sistema y selección del lazo de control	210
3.7. SELECCIÓN DE MOTOR ELÉCTRICO	211
3.8. DIMENSIONAMIENTO DE CIRCUITOS DE POTENCIA	212
3.9. SELECCIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES	213
3.10. ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN ADECUADO	214
3.11. PSEUDOCÓDIGO PARA PROGRAMACIÓN EN SOFTWARE	216
3.12. INTERFASE DE USUARIO	218
3.13. MANDO MANUAL PARA DOMO	222

CAPÍTULO IV

PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL PROTOTIPO

4.1. ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	224
4.2. INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA	227
4.3. PRUEBAS EN DESPLAZAMIENTO ANGULAR	227
4.3.1. Pruebas en posicionado rápido.	228
4.3.2. Pruebas en velocidad de “tracking”	229
4.4. PRUEBAS EN EL RESTO DE SENSORES Y ACTUADORES	229
4.5. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	230
4.6. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICO	232

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES	236
5.2. RECOMENDACIONES	238
GLOSARIO	239
BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES	249
Libros y manuales	249
Enlaces de Internet	250

ANEXOS

- Anexo A: Plano del Observatorio desarrollado en Autocad
- Anexo B: Análisis estructural de la cúpula del Observatorio
- Anexo C: Fotografías de las instalaciones del Observatorio
- Anexo D: Diagrama simplificado de conexiones eléctricas principales
- Anexo E: Programación del microcontrolador PK2100
- Anexo F: Programación del microcontrolador PIC18F2550
- Anexo G: Diagramas eléctricos en circuitos de control de telescopio y de detección de lluvia
- Anexo H: Documentación técnica de elementos utilizados en el prototipo

INTRODUCCIÓN

Este documento contiene un detalle breve de proyecto para la automatización del posicionamiento de la cúpula del Observatorio Astronómico de Quito, destacando la factibilidad de modernizar su funcionamiento cuando la instrumentación electrónica, el control digital y el manejo de potencia la extienden una mano. Enlista las actividades realizadas durante la pasantía, dejando el proyecto abierto para una eventual implementación y adjunta un análisis estructural por parte de un arquitecto, docente de la ESPE sede Latacunga y ciertas pautas para lograr los mejores resultados en la automatización.

En los telescopios convencionales, el movimiento de posicionamiento y guiado es controlado en dos grados de libertad. Esto significa que el telescopio puede obtener imágenes de casi cualquier punto del cielo en el firmamento posicionando el telescopio con dos movimientos angulares. Para el guiado del telescopio se necesita además compensar el movimiento de rotación de nuestro planeta. Esto implica ajustar continuamente la posición del telescopio para mantener fijo el punto de observación deseado. En estos telescopios las funciones de posicionamiento y guiado son normalmente supervisadas por el operador ó investigador in situ. Por lo tanto es obvio que tareas adicionales como monitoreo, mantenimiento preventivo y correctivo y otros de todo el observatorio, se llevan a cabo por el personal de turno.

Este proyecto desea establecer un enlace de control y un control automático del telescopio. Así se van a automatizar muchas de las funciones que son tareas del personal de observatorios convencionales.

Es un hecho conocido que la automatización de un proceso industrial reduce costos de operación e incrementa la productividad. Esta misma filosofía se la pretende poner en práctica al automatizar un observatorio, y se pueden enumerar las principales ventajas: primera, se contará con un observatorio de alta calidad con bajos costos de operación y mantenimiento. Segunda, la productividad en horas de observación al día sería superior a la de observatorios convencionales. Esto significa una mayor eficiencia en el uso del

instrumento a un costo mucho menor. Tercera, no se requeriría de más personal para su operación, una sola persona desde su consola de usuario podría operar todo el observatorio.

Los procesos u operaciones del telescopio que deben ser automatizados son divididos en control, diagnóstico y comunicación:

- 1) Lectura de las variables meteorológicas y diagnóstico de la estación meteorológica para confirmar las condiciones favorables de operación.
- 2) Control y diagnóstico de apertura y cierre de la cúpula del observatorio.
- 3) Control y diagnóstico de la posición y guiado del telescopio.
- 4) Control y diagnóstico de la instrumentación óptica y electrónica del telescopio.
- 5) Transferencia de imágenes y datos utilizando un sistema de comunicación computarizado.

Cada uno de los subsistemas que serán controlados deberá responder a comandos de control manual, remotos y automatizados. El diagnóstico de los subsistemas y dispositivos, deberá responder a comandos locales y remotos además de un ciclo automático de diagnóstico programado.

Las actividades para la automatización del telescopio estarán divididas en varias fases. Estas actividades estarán fuertemente ligadas a otras fases de desarrollo del telescopio que debido a su naturaleza precederán a algunas de las fases de automatización. Sin embargo, es posible identificar cuatro actividades generales para la automatización del telescopio. La primera actividad consiste en las pruebas y validaciones de los circuitos de manejo de motores y programas para el control y diagnóstico del telescopio y la cúpula. La segunda actividad se concentrará en el desarrollo de los circuitos de manejo de motores para el control y programas para control y diagnóstico del sistema de observación. Como tercera actividad se desarrollarán los circuitos de acoplamiento necesarios para el control y monitoreo de suministro de energía y sistema monitor del clima. La cuarta actividad se enfocará a los circuitos de acoplamiento y programas para la transferencia de datos.

En el caso del telescopio principal del Observatorio Astronómico de la Alameda, adscrito a la Escuela Politécnica Nacional, dada su trascendencia y contribución a la Astronomía desarrollada en Ecuador en épocas pasadas, el presente estudio permitirá una operación del mismo de forma más acorde a la tendencia actual respecto a esta actividad, con la consigna de lograr una mejora significativa y manteniendo inalterable su condición de referente histórico para la ciudad.

Cabe destacar la relativa integridad con la que (específicamente) telescopio y cúpula principales de este Observatorio han arribado a nuestros tiempos, con su instrumental óptico casi intocado y estructura metálica robusta. Con características que permitieron la labor de gente de ciencia en siglos pasados, hoy quizá por la gigantesca brecha tecnológica, lo hace similar en prestaciones a telescopios y observatorios para aficionados. Sin embargo, por el hecho hasta el momento de que es el único telescopio en el país que ha sido utilizado y se pretende continuar utilizándolo para la investigación y difusión de la Astronomía, se anhela que recobre y automatice su operabilidad. Es de conocimiento general que todo artefacto construido en tiempo antiguo se lo diseñaba y ensamblaba para que dure “toda la vida”, y estos no son la excepción.

Por esta misma afirmación es que se convierte en una tarea ardua la pretendida automatización del proceso de observación de astros, desarrollado 100% en forma manual según lo constatado, así como tabular la información necesaria en pos de acoplar debidamente aquellos datos obtenidos con los requerimientos de hardware y software para control automático. Como era de esperarse, ciertos conocimientos básicos en lo que se refiere a la Astronomía fueron aprendidos para que sirvieran de ayuda en el desarrollo de este estudio, y resultó un refresco para mi mente, ya que desde edad temprana tengo el gusto del saber y de la curiosidad en dicha Ciencia.

En el Capítulo I se ha compilado los aspectos medulares de la observación astronómica para el correcto entendimiento del movimiento de la esfera celeste y cómo es que un telescopio se vale de aquello para observar un astro.

En el Capítulo II existen los fundamentos de electrónica y control que se pretende acoplar a los dispositivos opto – mecánicos con los que ha funcionado el observatorio desde que fue construido.

En el Capítulo III arranca el análisis y diseño del sistema de automatización de domo, en este caso se parte desde el modelado de la planta ya que es un sistema físico con referencias muy escasas de comportamiento dinámico y estático hasta la total operabilidad sin que el operario mueva ningún instrumento óptico ó mecánico de forma manual.

En el Capítulo IV es construido y testeado un modelo físico de la estructura del domo del observatorio con el propósito de hacer más versátil la experimentación real del sistema completo de control, con esto los resultados de la implementación en la estructura original podrán ser más exactos.

Finalmente en el Capítulo V da a lugar las conclusiones y recomendaciones de este estudio y experimentación.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE ASTRONOMÍA

La revisión de aspectos básicos respecto a la Astronomía tiene lugar en este capítulo. Cada vez es mayor el número de instituciones dedicadas a esta rama del saber que han emprendido la incorporación de tecnología de punta en su labor de observación de astros, por ello el Observatorio Astronómico La Alameda es ahora sujeto de esta renovación; al conocer más en este tema se recurre a captar la información precisa acerca de observatorios astronómicos que permita una interpretación entendible de las variables manipuladas en sus procedimientos, analizar su comportamiento y que puedan entonces converger hacia un proceso automatizado.

Para citar algunas de las variables tenemos la configuración óptica de un telescopio, elementos físicos del mismo, tipos de telescopios, sistemas de coordenadas, situación geográfica, etc. Finalmente el detalle de la situación actual del Observatorio motivo de este estudio y los planes para su automatización.

1.1 ÓPTICA DEL TELESCOPIO

1.1.1 Lente convexa: Una lente convexa es más gruesa en el centro que en los extremos. La luz que atraviesa una lente convexa se desvía hacia dentro (converge). Esto hace que se forme una imagen del objeto en una pantalla situada al otro lado de la lente. La imagen está enfocada si la pantalla se coloca a una distancia determinada, que depende de la distancia del objeto y del foco de la lente. La lente del ojo humano es convexa, y además puede cambiar de forma para enfocar objetos a distintas distancias. La lente se hace más gruesa al mirar objetos cercanos y más delgada al mirar objetos lejanos

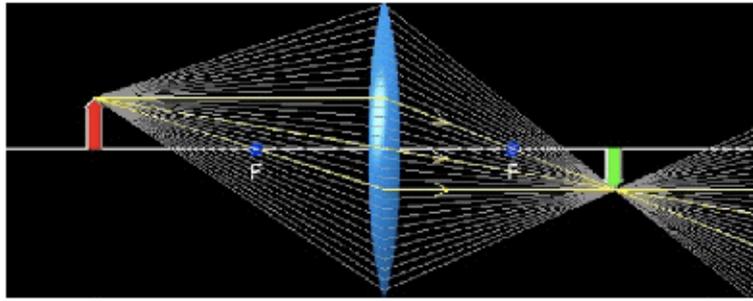


Fig. 1.1: Principio sobre lentes convergentes (convexas)

1.1.2 Lente cóncava: Las lentes cóncavas están curvadas hacia dentro. La luz que atraviesa una lente cóncava se desvía hacia fuera (diverge). A diferencia de las lentes convexas, que producen imágenes reales, las cóncavas sólo producen imágenes virtuales, es decir, imágenes de las que parecen proceder los rayos de luz. En este caso es una imagen más pequeña situada delante del objeto (el trébol).

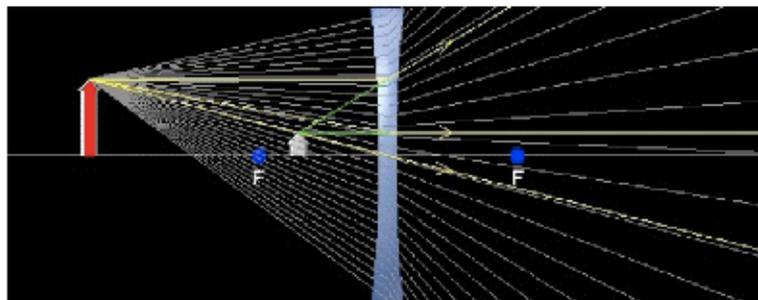


Fig. 1.2: Principio sobre lentes divergentes (cóncavas)

Combinados, lentes convergentes y divergentes pueden proporcionar los parámetros ópticos que se necesitan. Cuando la luz pasa por dos o más lentes, la acción combinada puede determinarse, si se considera la imagen formada por la primera lente como el objeto de la segunda, y así sucesivamente. La ampliación total producida por un sistema de lentes es el producto de los aumentos o ampliaciones producidas por cada lente del sistema. Cabe destacar el hecho de que el principio es muy similar en el caso de espejos convexos y cóncavos, y se lo muestra en la figura 1.3

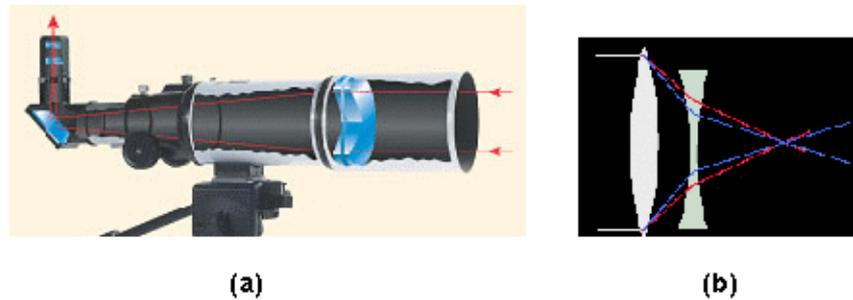
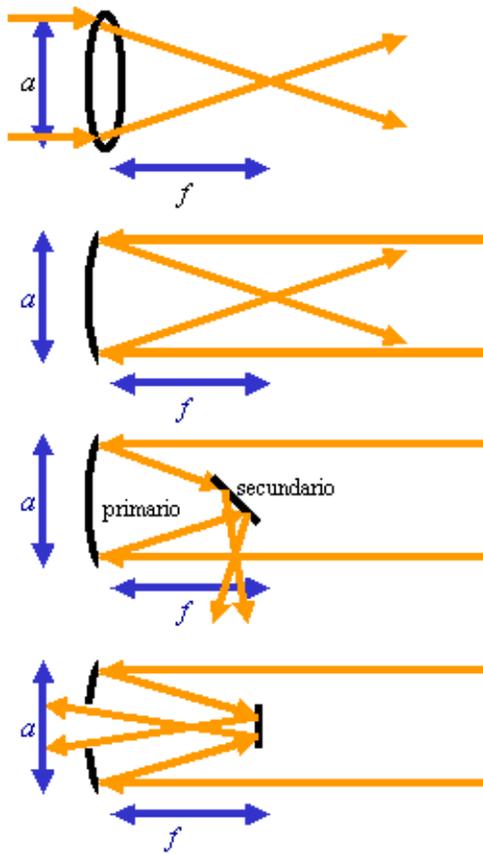


Fig. 1.3: (a) Disposición óptica de lentes convexas y cóncavas en un telescopio; (b) Esquema simplificado de las lentes

1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE TELESCOPIOS

- **Apertura:** Es el diámetro de la lente o espejo principal, la más importante característica de un telescopio. La cantidad de apertura que se desee obtener está vinculada a que tipo de telescopio se escoja.
- **Lente o espejo objetivo:** Mientras mayor sea su diámetro, mejor. La idea básica es que esta lente o espejo pueda crear un cono de luz dirigido a un punto focal (foco). Ese cono en el foco es entonces magnificado por el ocular.
- **Capacidad de captura de luz:** Depende de la apertura; permite una visión clara y detallada de objetos distantes. Los telescopios son como “baldes” recolectores de luz más que magnificadores de imagen.
- **Resolución:** Es lo que hace a la imagen mejor o peor definida. Aumenta al existir un incremento en la apertura. Una baja resolución resulta en imágenes difusas.
- **Magnificación:** Cuántas veces la imagen obtenida aparece más grande que en el tamaño actual. Para un telescopio, a una magnificación alta tiende la imagen a difuminarse, a perder brillo y a reducir el campo de visión. Es por esta razón que se utiliza un sistema de enfoque para compensar los efectos de una alta magnificación.



$f = \text{Longitud focal}$ – La distancia que le toma a la luz llegar al foco después de refractarse a través de una lente o de reflejarse en un espejo.

$a = \text{Apertura}$ – Es el diámetro del lente principal (objetivo) o del espejo (primario)

Fig. 1.4: Incidencia de los rayos de luz en espejos convexos y cóncavos y parámetros de un telescopio representados en los mismos

La longitud focal de un telescopio es la distancia que está la luz del lente primario para converger a un punto. Se expresa a menudo como f /ratio:

$$\frac{f}{ratio} = \frac{\text{apertura del lente}}{\text{longitud focal del lente}} \quad (1.1)$$

Ejemplo: Lente con apertura de 200 mm. con una longitud focal de 1200 mm.:

$$\frac{f}{ratio} = \frac{200}{1200} = \frac{f}{6}$$

Aplicado al telescopio del Observatorio Astronómico de La Alameda: lente de 320 mm. de apertura y longitud focal de 3190 mm.

$$\frac{f}{ratio} = \frac{3190}{320} \cong \frac{f}{10}$$

Con la visibilidad normal del ojo humano, apenas se puede capturar una porción de la luz que proviene de objetos lejanos, la débil luz desde dichos objetos tiene la propiedad de viajar en rayos casi paralelos.



Fig. 1.5: Incidencia normal de la luz visible en el ojo humano

Al utilizar una lente, esta capta luz en un área mayor de un objeto lejano y la compacta al tamaño de la retina. Durante este proceso una pequeña parte de la luz se pierde, con lo que aun así se puede distinguir una imagen más brillante.



Fig. 1.6: Incidencia de luz en el ojo modificada por las lentes

El telescopio ecuatorial Mertz es utilizado en estas observaciones. Este telescopio es refractor, con una lente de 32 cm. de diámetro. Este equipo amplifica 2000 veces más la cantidad de luz percibida por el ojo humano.

Los fabricantes normalmente especifican el campo aparente de visión (en grados) de sus oculares. Esta medida significa el tamaño del “pedazo” de cielo que se puede observar sin distorsión en la mira del telescopio. A mayor campo aparente de visión por ende se podrá observar un pedazo más grande de cielo. Con magnificaciones más altas se reduce el campo de visión.

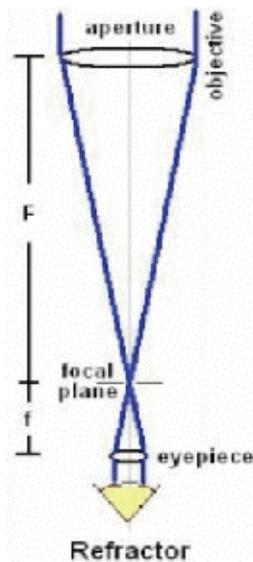


Fig. 1.7: Disposición de los lentes objetivo y ocular en un telescopio refractor, con la medida de la distancia y plano focal

1.3 ELEMENTOS DE UN OBSERVATORIO ASTRONÓMICO

Los observatorios modernos suelen incluir telescopios, aunque el término observatorio se aplica también a edificios utilizados en la observación de fenómenos magnéticos o meteorológicos. Entre los observatorios ópticos más importantes en la actualidad se encuentran los siguientes: el Observatorio de Calar Alto en Almería (España), los observatorios del Teide y del Roque de los Muchachos en las Islas Canarias (España), los observatorios estadounidenses de Monte Wilson, de Monte Palomar, de Kitt Peak y Mauna Kea, y el Observatorio de Crimea dependiente de la Federación Rusa. Por otra parte, en el hemisferio sur destacan el Observatorio Meridional Europeo de La Silla (Chile) y el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (Chile), entre otros.

Muchos de ellos están situados en lo alto de las montañas para evitar que los elementos distorsionadores de la atmósfera de la Tierra se interpongan entre los instrumentos y los objetos astronómicos que se desean observar. El observatorio de la figura 1.8 posee un telescopio principal refractor de 150 cm. de diámetro, un telescopio reflector con una lente de 400 cm. de diámetro y un radiotelescopio de 11 m. de diámetro

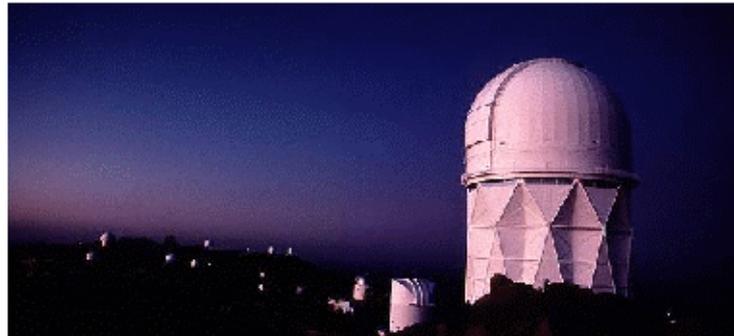


Fig. 1.8: El Observatorio Nacional de Kitt Peak, en Estados Unidos, alberga una gran variedad de instrumentos

Poseen diferentes propósitos según su clasificación; existen los dedicados exclusivamente a la Astrofísica (por lo general los más modernos), otros especializados en la observación y descubrimiento de estrellas, cometas o planetas y los que tienen fin meramente de difusión, como es el caso actual del Observatorio Astronómico de La Alameda es decir como una “biblioteca” real de la astronomía en el país, a través de observaciones periódicas del cielo de Quito. También extendería su utilidad para la preparación de estudiantes en las técnicas de la observación astronómica.



Fig. 1.9: El Observatorio del Roque de los Muchachos, situado en la isla de La Palma (Islas Canarias), alberga varios telescopios famosos, entre ellos el William Herschel, de 4,2 m de diámetro.

Los elementos de un observatorio astronómico pueden variar de uno a otro, sin embargo los principales se detallan a continuación:

- **Base:** Conocida también como cimiento del observatorio, sirve de sustento a la estructura móvil y al instrumental fijo del observatorio, en ciertos casos provee además de una elevación para el observatorio sobre el nivel del suelo.



Fig. 1.10: Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir; este observatorio se encuentra en Baja California, México. Su telescopio principal es un reflector de 2,13 m y 3 toneladas.

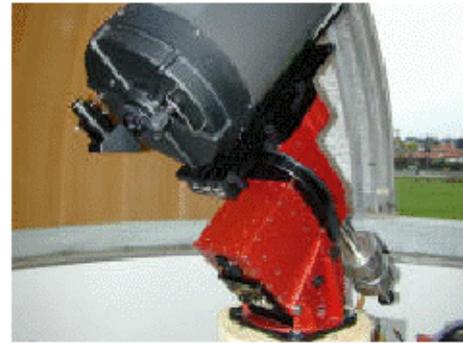


Fig. 1.11: Detalle de la construcción del cimiento en un observatorio astronómico a instalarse en un domicilio, a partir de una pared circular de ladrillos

- **Montura:** Soporte mecánico de ciertos aparatos, principalmente los ópticos. Brinda la movilidad que el telescopio requiere para la observación astronómica según los ejes con los que esté construido; se ubica muchas ocasiones en el centro del sistema de coordenadas del observatorio. La figura 1.12 muestra monturas de telescopios tanto antiguas como modernas.



(a)



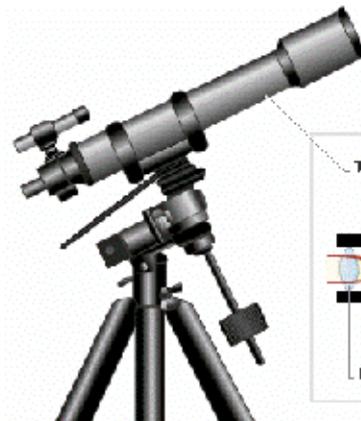
(b)

Fig. 1.12: (a) Montura del telescopio en el observatorio Lowell; (b) Montura en un telescopio moderno

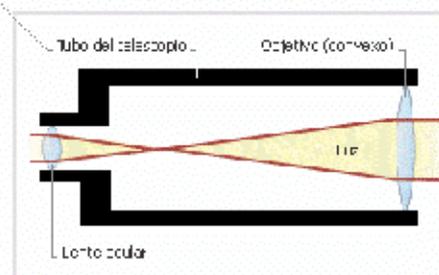
- Telescopio:** Instrumento con el que se consiguen imágenes amplificadas de objetos distantes. Se sustenta en los ejes de la montura y permiten su fácil movilidad y posicionamiento, casi siempre incluyen un tipo de telescopio de menor alcance acoplado en forma paralela al lente principal y se denomina buscador; junto a la montura es el principal componente de un observatorio astronómico. La figura 1.13 muestra varios telescopios en sus monturas y con el esquema de su sistema óptico.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.13: Telescopios típicos; (a) telescopio reflector, (b) telescopio reflector, (c) diagrama del sistema óptico refractor

- Domo ó cúpula:** Forma o estructura cupuliforme, con forma de bóveda o de media esfera. Cubierta cóncava de un edificio, por lo general de forma semiesférica, sobre una planta circular o elíptica; en el caso de observatorios astronómicos está

provista de una abertura en toda la extensión de su diámetro o sólo en cierto tramo del mismo, que se abre o cierra mediante compuertas. Toda esta estructura reposa sobre un riel en la base y permite su rotación gracias a pequeñas ruedas acopladas; cabe mencionar el mecanismo sea por engranes o por cadena que impulsa el giro del domo. Al girar dicha abertura hace posible que la lente principal del telescopio pueda apuntar hacia determinado astro a ser observado, protegiéndolo todo el tiempo de cualquier perturbación luminosa o atmosférica. La figura 1.14 reseña un ejemplo tipo de la estructura de domo.



Fig. 1.14: Domo semiesférico con su compuerta cerrada, instalada sobre la base

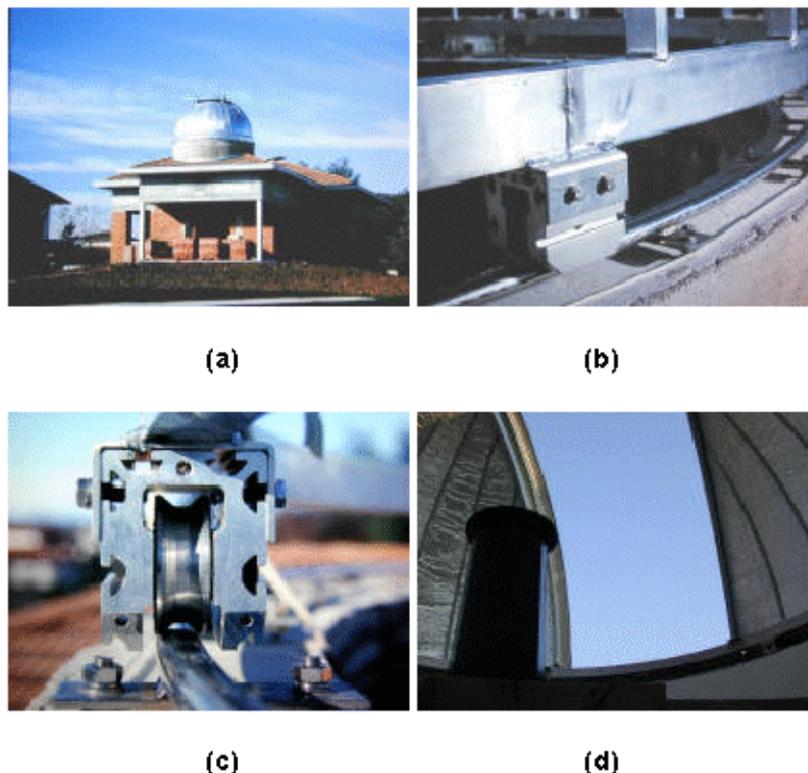


Fig. 1.15: (a) Vista exterior del domo semiesférico con estructura en aluminio y acero inoxidable, (b) vista de la riel de domo, (c) ruedas del domo que permiten su movimiento, (d) vista interior mostrando la abertura

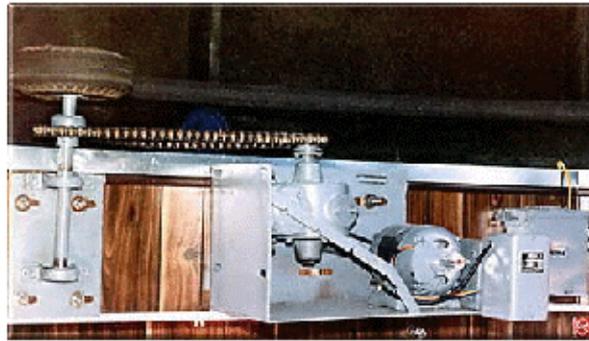
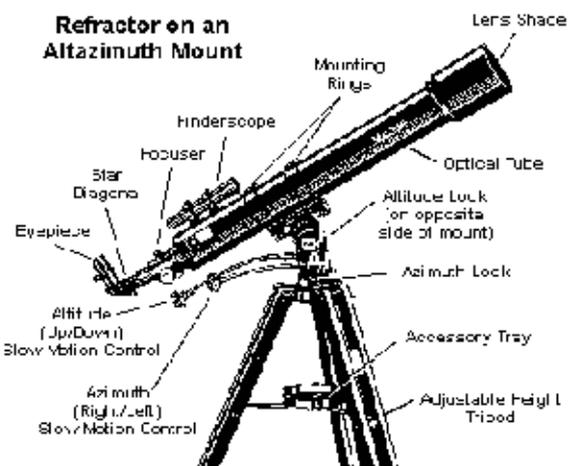


Fig. 1.16: Sistema para generar el movimiento del domo a base de motor eléctrico y acople por banda y engranes

1.4 TIPOS DE TELESCOPIOS

Existen dos tipos básicos: los refractores y los reflectores.

- Refractores:** Como los conocidos binoculares, los telescopios refractores usan lentes convexas y cóncavas, alineadas perfectamente dentro de un tubo opaco y largo. Aunque la mayoría son limitados en campo de visión, brindan una excelente calidad de imagen con resolución inigualable. Con lentes bien colimados las imágenes resultan bien definidas. Actualmente este tipo de telescopios poseen un mayor costo que sus similares reflectores, ya que las lentes y la dimensión del tubo son un inconveniente al fabricarlos.



(a)



(b)

Fig. 1.17: (a) Diagrama del telescopio refractor con su montura; (b) Telescopio refractor real

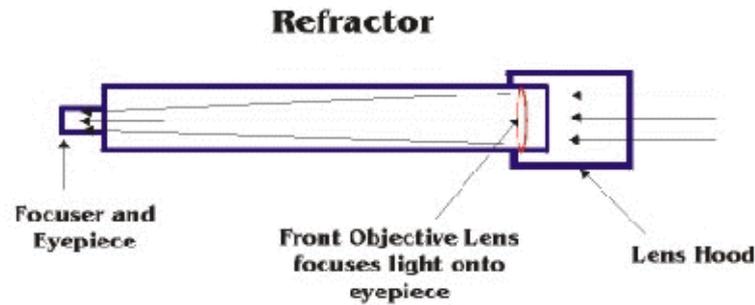


Fig. 1.18: Óptica del telescopio refractor

- Reflectores:** Se valen de espejos cóncavos y convexos en lugar de lentes, alineados dentro de un tubo mucho más corto que en un refractor, capturan la luz en su superficie para que se refleje en uno o varios espejos más hasta el objetivo. Suelen tener mayor campo de visión, calidad de imagen aceptable pero de menor resolución que las obtenidas con un refractor; al igual que utilizando lentes, la superficie de los espejos debe ser perfectamente pulida. Como ejemplos se pueden citar los tipos de telescopios reflectores Newtoniano y Schmidt – Cassegrain, este último un híbrido entre refractor y reflector (catadióptricos).

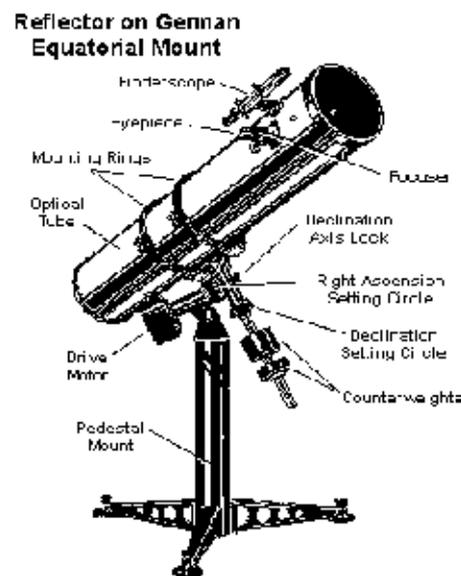


Fig. 1.19: Diagrama del telescopio reflector en montura ecuatorial

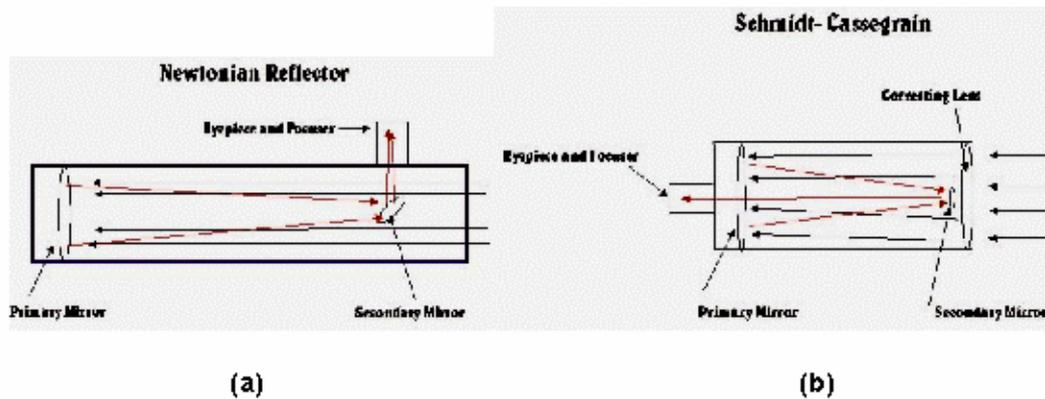


Fig. 1.20: Óptica de un telescopio reflector; (a) disposición newtoniana, (b) Schmidt - Cassegrain

1.5 MONTURAS Ó SOPORTES

Los telescopios durante una observación deben ser sostenidos por algún tipo de soporte o montura, que entre otras cosas permite:

- Mantener el telescopio estable.
- Apuntar el telescopio a un objeto en el cielo.
- Compensar el movimiento de rotación de la Tierra.
- Liberar a usuario para otras actividades relacionadas a la observación.

1.5.1 Tipos de monturas

Aquí debe hacerse notar la existencia de dos tipos de monturas, las más básicas y extensamente utilizadas en telescopios:

- **Montura Altitudinal – Azimutal:** Posee dos ejes de rotación, uno horizontal y uno vertical. Por su forma de apuntar a un astro es el más fácil de utilizar; inicia girando en el eje horizontal de lado a lado (azimut) hacia la posición horizontal del objeto en el cielo, y luego elevar o bajar el telescopio mediante el eje vertical (altura) hasta la posición vertical del objeto. Como desventaja tienen que girar ambos ejes para la observación continua de un objeto en el cielo (la montura producirá una especie de “zig – zag” del telescopio en el seguimiento de dicho

objeto); las ventajas residen en su bajo costo y que no necesita ser alineado, sólo afirmarse al suelo.



Fig. 1.21: Telescopio en montura alt - azimutal

- **Montura ecuatorial:** También posee dos ejes perpendiculares de rotación (ascensión recta y declinación), pero éstos siguen trayectorias diferentes a la montura alt – azimutal, en lugar de elevar el telescopio con respecto a su eje de altitud, lo hace con referencia al eje de rotación de la Tierra. El azimut tiene su “equivalencia” en las diferentes coordenadas de declinación. El sistema de coordenadas que utiliza la montura ecuatorial reside en una proyección hacia la esfera celeste del sistema de coordenadas terrestres (latitud y longitud). Para observar un objeto en el cielo, basta girar en el eje de declinación hasta dicha coordenada que coincida con el objeto, y después girar el eje de ascensión recta hasta el “huso” horario en el que se encuentre el objeto. De allí sólo este último eje se moverá, ya que el eje de declinación sigue al objeto en todo su recorrido aparente por el cielo y tendrá al mismo siempre dentro de la mira del telescopio. Para poder realizar este movimiento la montura, su eje de ascensión recta debe estar alineado con el polo norte terrestre (según la latitud geográfica a la que se encuentre el observador).



Fig. 1.22: Telescopio en montura ecuatorial

1.6 COORDENADAS CELESTIALES

Cuando la gente empezó a mirar hacia el cielo nocturno, se impuso la necesidad de una manera estándar de establecer posiciones de los cuerpos celestes en el cielo. Comparada con el tamaño de la Tierra, todos los objetos celestes están a mucha distancia. Como dichos cuerpos parecían ocupar posiciones relativamente fijas en el cielo, una idea conveniente acerca de esta situación sería imaginar a la Tierra ubicada en el centro de una esfera más grande. Las estrellas ocuparían posiciones fijas en la superficie de esta “esfera celeste” y la Tierra giraría en ella. Obviamente esto no refleja la situación real de las estrellas en el cielo, pero es un buen modelo para interpretar las cosas desde nuestro punto de vista.

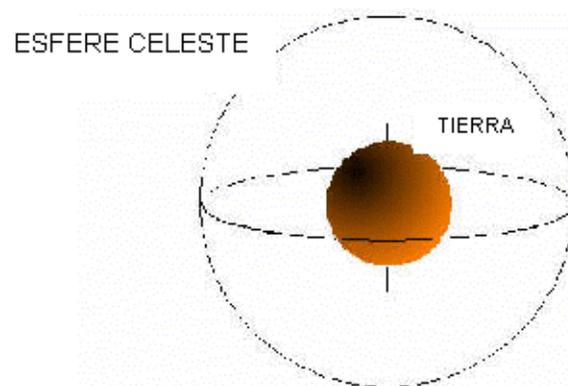


Fig. 1.23: Esquema de la esfera celeste y la Tierra en su interior

Cada observador podrá entonces mirar hacia el cielo como dentro de una gran esfera, denominada bóveda o esfera celeste. Así, toda dirección a la que el observador apunte hacia la mencionada esfera la intersecará en un solo punto, y las posiciones de las estrellas y otros cuerpos celestes dentro de ella podrán medirse en coordenadas angulares (similares a la longitud y latitud geográficas). No importa que tan lejos o cerca se encuentren las estrellas, todas aparecen iguales en la esfera celeste (esta situación en particular se tratará más adelante).

La Tierra girará dentro de esta esfera, pero por supuesto a nuestro ojo parecerá que es la esfera celeste la que gira en torno a la Tierra. Si la línea imaginaria del eje de rotación de la Tierra se extendiera hacia el infinito, el punto donde corta la esfera celeste se denomina polo celestial. Si tomamos la Tierra como fija, todas las estrellas aparecen como girando alrededor del polo celestial.



Fig. 1.24: De izquierda a derecha el movimiento aparente de las estrellas en el cielo según el tiempo desde el inicio de observación

Un requisito básico para estudiar los cielos es determinar sus coordenadas. Para especificar posiciones en el cielo, los astrónomos han desarrollado varios sistemas de coordenadas. Cada uno utiliza una “malla” proyectada en la esfera celeste, en analogía con el sistema de coordenadas geográficas de la superficie de la Tierra. Cada sistema difiere uno de otro en su elección del plano fundamental, el cual divide el cielo en dos hemisferios iguales a lo largo de un círculo mayor.

Los dos más importantes sistemas de coordenadas para astronomía se detallan a continuación:

- Sistema de coordenadas de horizonte ó alt - azimutal:** Este sistema de coordenadas utiliza el horizonte aparente del observador, en la ubicación geográfica que se encuentre, como plano fundamental. El origen de coordenadas es la ubicación misma del observador, el polo celestial del horizonte aparente al observador se denomina cenit, y el polo opuesto, nadir. Tiene dos coordenadas fundamentales: la altura y el azimut. Para todo punto en la esfera celeste, todo el alrededor del horizonte aparente del observador se constituye en un plano, que es desde donde se mide la altura del objeto, en grados positivos mientras se acerca al cenit. Entonces se define a la altura de un cuerpo celeste en este sistema como el ángulo de un objeto por sobre o por debajo del horizonte. La segunda coordenada es el azimut, definido por el ángulo de un objeto alrededor del horizonte, casi siempre medido desde la posición norte hacia el este. Para realizar una analogía con el plano origen de la coordenada de altitud, el azimut posee un plano similar pero en forma vertical (plano que pasa por los puntos norte y sur, y se denomina meridiano local) que coincide con el meridiano geográfico según la ubicación del observador.

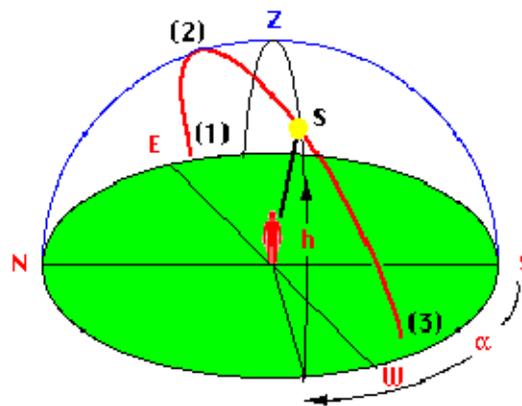


Fig. 1.25: Diagrama del campo de visión de un observador en las coordenadas alt-azimutales

El observador está ubicado en el centro de su “esfera celeste” con el cenit (Z) sobre su cabeza y los puntos cardinales N – E – S – W. Cualquier cuerpo celeste puede ser identificado por las coordenadas altura (h) y azimut (α). La altitud es la distancia angular por sobre el horizonte ($0 < h < 90^\circ$), y el azimut la distancia angular, medida a lo largo del

horizonte, hacia el oeste del punto cardinal sur (en astronomía) o hacia el este del punto norte en náutica ($0 < \alpha < 360^\circ$).

El movimiento de un objeto en la esfera celeste empieza cuando aparece en (1). En el punto (2) cruza por el meridiano del observador, alcanzando su máxima altitud sobre el horizonte, y finaliza en (3).

Por deducción, este sistema de coordenadas está fijado a la ubicación geográfica, no a la esfera celeste. Implica que la altitud y el azimut de un objeto cambian con el tiempo, mientras aparenta movimiento en el cielo. Adicionalmente, como este sistema está definido por el horizonte local, el mismo objeto observado desde diferentes ubicaciones en la Tierra al mismo tiempo tendrá diferentes valores de altura y azimut.

- **Sistema de coordenadas ecuatoriales:** Es el sistema de coordenadas más utilizado para indicar la ubicación de cuerpos celestes. La esfera celeste tendrá al observador en su centro. Es un sistema similar al sistema de coordenadas geográficas, porque utilizan el mismo plano fundamental y los mismos polos. La línea ecuatorial geográfica se proyecta sobre la esfera celeste para denominarse ecuador celeste, que de idéntica manera dividirá la esfera celeste en dos hemisferios. Sus coordenadas se denominan declinación y ascensión recta.

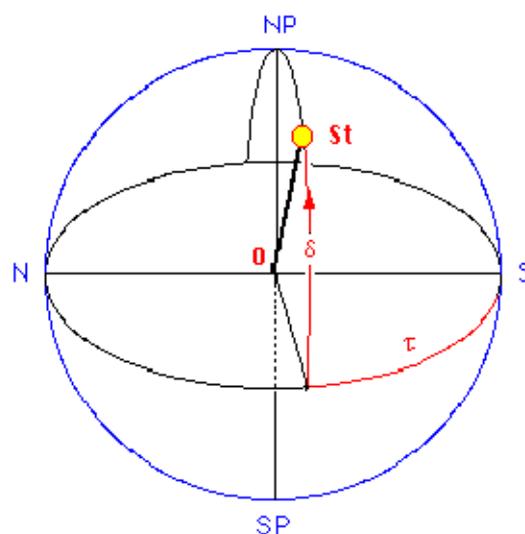


Fig. 1.26: Diagrama del campo de visión en coordenadas ecuatoriales

1.6.1 Declinación

Tiene como plano de origen el ecuador celeste, es el ángulo entre el ecuador celeste y la posición de la estrella. Con los paralelos geográficos proyectados en la esfera celeste, se puede notar la relación entre éstos y las coordenadas de declinación (un punto en el ecuador celeste tendrá una declinación de 0° , y un punto en el polo celestial tendrá declinación de 90°). Lo mismo corresponde para toda latitud geográfica, las coordenadas al sur del ecuador celeste tendrán declinaciones negativas, y las que van hacia el norte del mismo, positivas. Las unidades están en grados, y sus submúltiplos en minutos de arco (60 minutos de arco por grado) y segundos de arco (60 segundos de arco por minuto de arco).

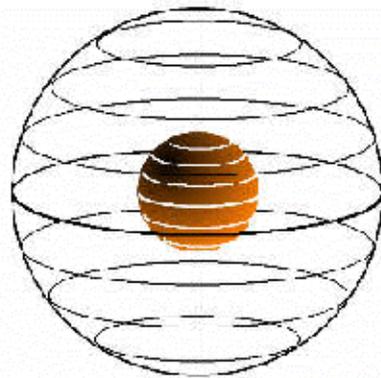


Fig. 1.27: Líneas imaginarias de declinación

1.6.2 Ascensión recta

La ascensión recta es el equivalente de la longitud geográfica en la esfera celeste. Así como el meridiano de Greenwich fue establecido de forma arbitraria como el meridiano 0, existe un punto de cierta constelación (Aries) que actúa como origen de coordenada de ascensión recta. Se mide entonces desde este punto de referencia, hacia el este, al cuerpo celeste. Las unidades de la ascensión recta vienen en horas, minutos y segundos en vez de grados (no confundir minutos y segundos con minutos de arco y segundos de arco), porque la rotación aparente de este sistema de coordenadas está relacionada con el tiempo sidereal y el ángulo horario. Ya que una rotación completa del cielo toma 24 horas en completarse, el movimiento de una estrella significa $(360 \text{ grados} / 24 \text{ horas}) = 15 \text{ grados} / \text{hora}$, equivale a moverse la estrella 1 grado cada 4 minutos.

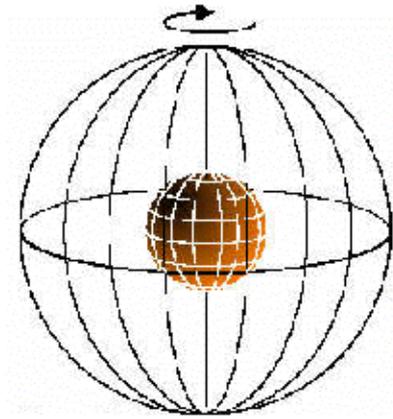


Fig. 1.28: Líneas imaginarias de ascensión recta

Juntando las coordenadas de declinación y ascensión recta la esfera celeste quedaría de la siguiente forma:

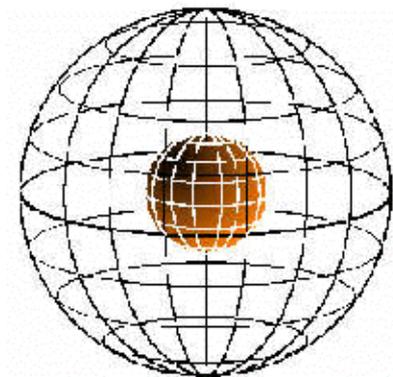


Fig. 1.29: Líneas de declinación y ascensión recta

1.6.3 Comparativa virtual entre los sistemas de coordenadas celestiales

En vista de lo descrito en el tema de coordenadas celestiales, se ha capturado pantallas de un software relacionado con la astronomía, mostrando un panorama de las estrellas tal y como se apreciarían en el cielo nocturno en forma real, y se denomina Stellarium, en su versión 0.8.0. El mismo despliega en perspectiva la gran mayoría de cuerpos celestes encasillados en lo que se denominan catálogos, no es más que una compilación de datos de cada estrella, planeta, nebulosa, cometa y demás objetos presentes en la esfera celeste. Organizada la información de esta manera, es posible visualizar un verdadero “mapa” del cielo, y con las significativas herramientas que dispone para un mejor entendimiento, como

graficación de sistemas de coordenadas, búsqueda rápida de objetos, zoom, aceleración - retroceso de paso de tiempo, determinación de coordenadas geográficas, varias opciones de renderizado, etc.

Las figuras 1.30 hasta la 1.33 son sólo una simulación del comportamiento real de la esfera celeste, pero logra una gran similitud para efectos explicativos de las coordenadas celestiales:

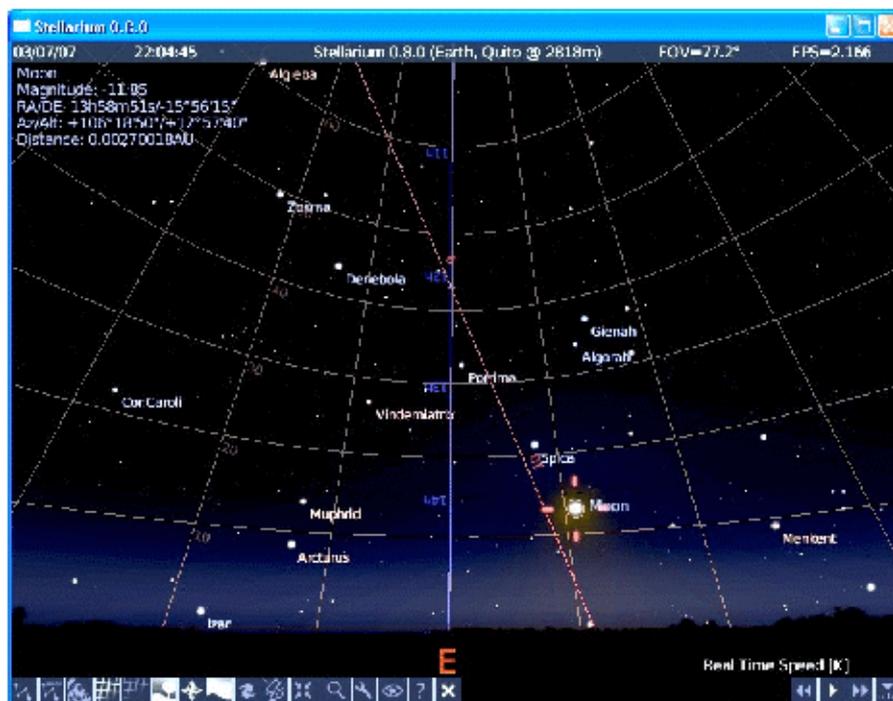


Fig. 1.30: Ventana del programa “Stellarium” que permite simular el comportamiento de la esfera celeste

La figura 1.30 es una vista en el horizonte hacia el Este del cielo nocturno (el sitio geográfico desde donde se observa es Quito, Ecuador), con las estrellas y sus nombres comunes, puede apreciarse la Luna y la malla que parece contener a todos los astros en el cielo es el sistema de coordenadas altazimutales, las líneas horizontales determinan la altitud en grados, creciente a medida que el objeto se eleva sobre el horizonte; y las líneas verticales representan el azimut del objeto también medido en grados positivos desde el punto cardinal Norte en sentido Este. Cabe resaltar la línea vertical que parte justo por sobre la letra que designa al punto cardinal Este, es conocida como el Ecuador celeste, y la línea roja, la que tiene cierta inclinación respecto a las verticales, es la denominada

ecliptica, línea imaginaria de referencia para todas las órbitas de los planetas del sistema solar. La manera como se aprecia esta “malla” en el cielo será la misma en cualquier ubicación geográfica.

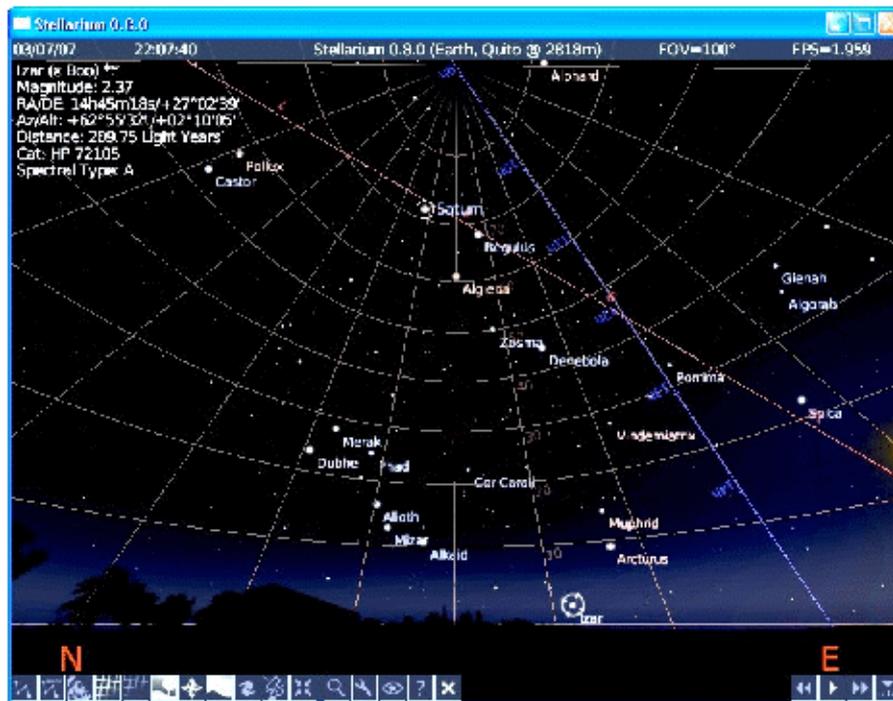


Fig. 1.31: Vista en perspectiva del horizonte mostrando los puntos cardinales y el cenit

La figura 1.31 presenta ahora una vista más ampliada que la perspectiva anterior, mostrando los puntos cardinales Norte y Este, también se alcanza a visualizar el punto al que convergen las coordenadas de altitud y azimut, es el cenit, ubicado justo por encima de nuestras cabezas, un punto perpendicular al plano del horizonte. Para este sistema de coordenadas el cenit se convierte en el polo celestial para poder orientarse en una observación, a primera vista resultaría sencillo tan solo nivelar un telescopio para que quede alineado con el cenit, y luego direccionarlo hacia el norte, recordar que este sistema de coordenadas es fijo hacia la Tierra o hacia la ubicación geográfica del observador, por lo que si se va a realizar observaciones con telescopios dispuestos en una montura altazimutal es imperante un seguimiento de los ejes casi perfecto, en este caso deben moverse altura y azimut todo el tiempo, y en ciertos intervalos las velocidades de giro de los ejes son variables según la ubicación.

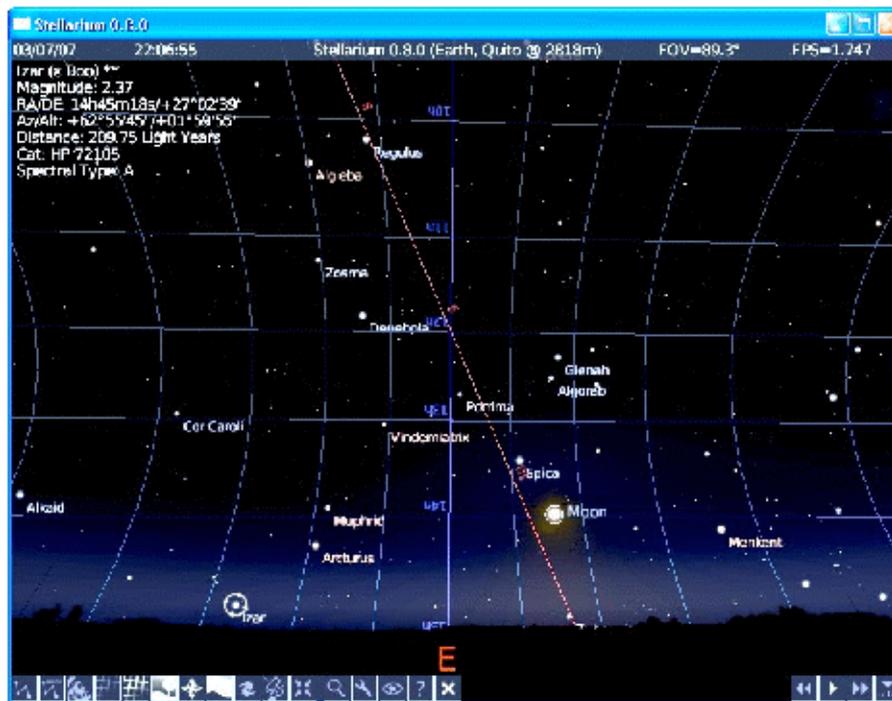


Fig. 1.32: Vista del horizonte en el punto cardinal Este

La figura 1.32 es la representación de las coordenadas ecuatoriales en el cielo, con la misma ubicación geográfica (Quito, Ecuador) y la misma fecha y hora; para este sistema las líneas horizontales pertenecen a la ascensión recta, medida en horas, minutos y segundos en similitud a los husos horarios terrestres. Las líneas verticales que parecen deformarse tienen en realidad a asemejarse a las líneas de latitud geográfica, y sirven para determinar la declinación de un objeto. Se ven el ecuador celeste graduado en las unidades de la ascensión recta y la eclíptica. Con un telescopio provisto de una montura ecuatorial, se procede alineando el eje de ascensión recta con el polo Norte celestial (en el caso de Quito, Ecuador este eje se ubica casi paralelo al plano del horizonte), quedando dicho eje a una inclinación sobre el plano equivalente a la latitud geográfica del observador, el eje de declinación en cambio situará la mira del telescopio hacia la “latitud” o declinación del objeto y luego se fija ese eje, para finalmente accionar el giro del eje de ascensión recta, en el sentido y ritmo adecuados para compensar la rotación de la Tierra y evitar que el astro salga de la mira del telescopio.

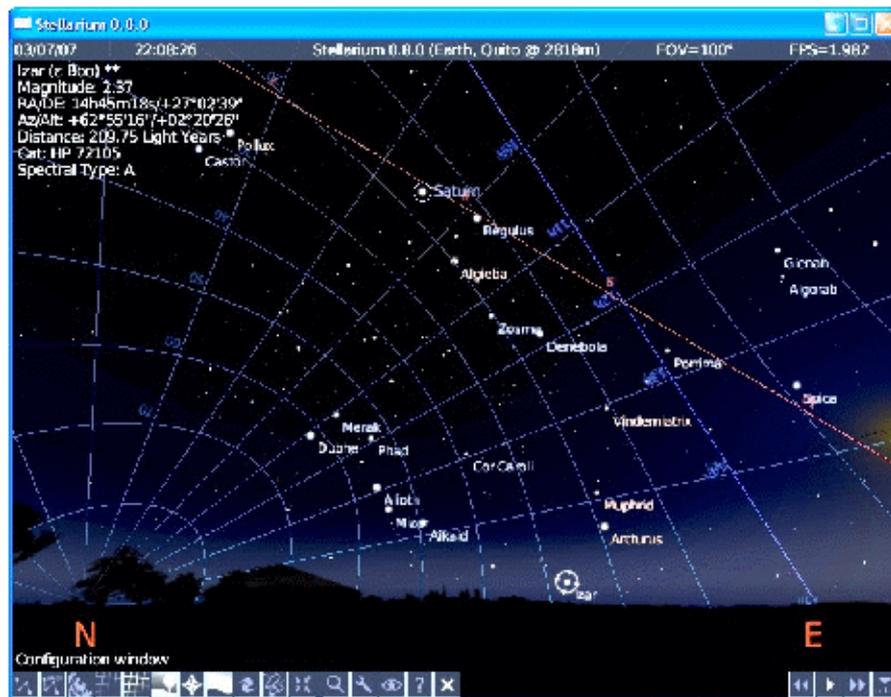


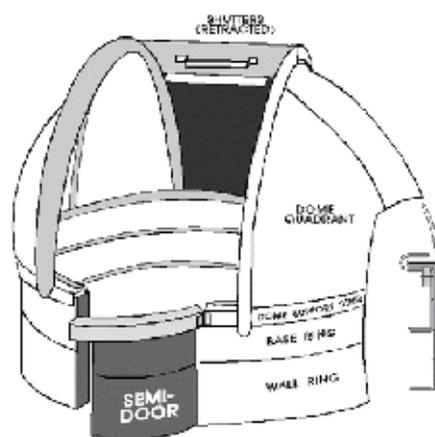
Fig. 1.33: Vista en el horizonte de los puntos Norte y Este

Con la misma perspectiva ampliada que se mostraron las coordenadas altazimutales, es apreciable la malla ecuatorial con sus polos celestiales: Norte y Sur, puntos donde convergen las coordenadas de este sistema. Debido a que las coordenadas ecuatoriales están fijas a la esfera celeste, el cómo se verá desde distintas latitudes geográficas varía por ejemplo en el polo norte sólo se podrá observar el hemisferio norte de la bóveda celeste, ocultando totalmente los astros del hemisferio Sur, y se tendrá el polo norte celestial justo en el cenit. Para el caso de nuestro país, este sistema lo convierte en uno de los mejores sitios del mundo para realizar observaciones astronómicas, ya que es posible que la totalidad de estrellas de ambos hemisferios puedan ser vistas al telescopio.

1.7 DOMOS Y SU PROPÓSITO

Para desarrollar una observación con telescopios (sobre todo en el estudio especializado de esta rama) se recurre a una estructura que sirva de protección al instrumental y optimice la calidad de imagen obtenida al atenuar la luminosidad no deseada circundante, en general estas funciones son básicas de los domos de observatorio; en términos acordes con los entendidos en Astronomía, los propósitos generales de la utilización de un domo son:

- Proveer de protección a los elementos (contra viento, lluvia, contaminación lumínica).
- Permitir una apertura que se abra o cierre según se lo requiera, y lo suficientemente amplia para que sean posibles las observaciones sin obstrucción.
- Que permita una alineación precisa de la apertura del domo con la estructura del telescopio (lente ó espejo principal).
- Entre otros, que tenga protección térmica, que opere con control local ó remoto, sincronización con el movimiento, del telescopio, etc.



(a)



(b)

Fig. 1.34: (a) Esquema de la estructura de un domo, (b) domo construido en aluminio con su compuerta abierta

El sistema completo de domo para observatorio posee dos bloques fundamentales: La estructura física en si y la parte generadora del movimiento y de control. Con respecto al primer bloque, cabe señalar que la tendencia actual para construcción de domos apunta al diseño en forma semiesférica, dejando de lado estructuras como la del Observatorio Astronómico de la Alameda que toma la forma de un reservorio de agua; es más, diseñarlo en forma semiesférica ayuda a adaptarlo de mejor manera a la configuración geométrica del telescopio y su montura, como se tratará más adelante. Además de optimizar el diseño para la geometría del domo, su disposición debe ser la más adecuada para su movilidad, al proveerlo de un sistema de rotación con pequeñas ruedas de apoyo montadas sobre un riel, con sistema de cadena, engranes, bandas u otro mecanismo. El diseño y fabricación de compuertas ha variado también relacionando lo que se puede apreciar en el Observatorio de la Alameda con los modelos actuales, estos últimos optimizan espacio y energía para

operarlos tal como es el caso de las compuertas deslizantes, batientes o corredizas (tipo lanfor). La figura 1.35 y 1.36 muestran diferentes tipos de acoples mecánicos al domo, mientras que las figuras 1.37 y 1.38 revelan, respectivamente, el sistema de riel de domo y la compuerta de la abertura central de un domo.



Fig. 1.35: Sistema motor – reductor con rueda de fricción acoplado al borde de la estructura giratoria del domo

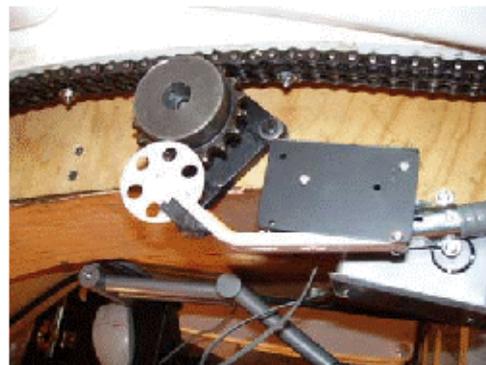
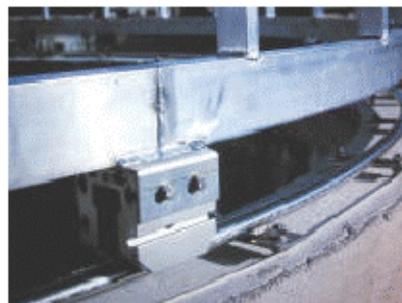


Fig. 1.36: Mecanismo de cadena del sistema de rotación del domo junto a encoder óptico



(a)



(b)

Fig. 1.37: (a) Riel circular de la base del domo; (b) Juego de rueda deslizándose sobre el riel

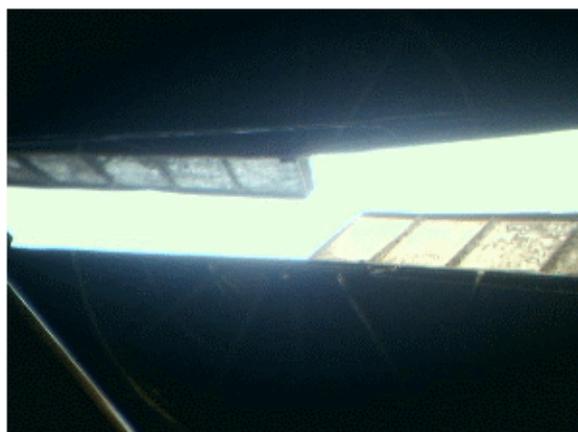


Fig. 1.38: Apertura central con sus compuertas superiores abiertas

El bloque motor - controlador propende el funcionamiento del sistema mecánico de rotación del domo, para un giro fácil de la estructura y lo complementa el controlador (driver de potencia, electrónica asociada al sistema electromecánico) para estabilizar el domo en caso de perturbaciones y que pueda llevar a cabo comandos para su utilización con el telescopio. En casos de observatorios profesionales se añaden bloques para comunicación via Ethernet, serial u otro enlace, sensado en tiempo real de variables atmosféricas, etc.

En lo que respecta a su sistema de rotación, este debe proporcionar al domo la velocidad adecuada para una determinada precisión en la posición angular, que es finalmente lo que se desea obtener de este conjunto estructura – motor – controlador. El sistema motor debe llegar también al accionamiento y control de compuertas según lo demande el proceso.

Se los construye de diversos materiales, enumerando entre los más importantes el aluminio, fibra de vidrio, acero inoxidable, madera y hierro. El domo del Observatorio de la Alameda es una estructura totalmente de hierro, ya que por aquella época los encargados de crearlo pertenecían a una constructora ferrocarrilera alemana (Existe una inscripción en una placa del domo del Observatorio, que textualmente dice “Maschinenbau Actien_Gessellschaft Nürnberg 1875”, una compañía limitada de locomotoras de una amplia división en Alemania, sede en la ciudad de Nuremberg en el año 1875).

Las dimensiones más significativas de un domo son su diámetro y el tamaño de apertura (el espacio que al abrirse las compuertas dejan disponible para que la lente del telescopio

realice observaciones sin obstrucción). El diámetro dependerá de la longitud del telescopio instalado en el observatorio, y de la geometría adosada al mismo.

1.8 GEOMETRÍA DE DOMO

Para mantener la alineación de la abertura del domo con la mira del telescopio es necesario girar la estructura a intervalos regulares de tiempo. El telescopio “mira” hacia dicha abertura en forma oblicua, que tan oblicua dependerá de la distancia entre tubo del telescopio y el eje polar, de la relación de dimensiones entre domo y tubo y de la distancia entre abertura y la intersección de los ejes de declinación y eje óptico.

Hay varias maneras de sincronizar la rotación del domo y el giro horario del telescopio en su montura. Se debe derivar un algoritmo basado en las ecuaciones trigonométricas que definen la relación geométrica entre la declinación del telescopio y el ángulo horario y el azimut del centro de la abertura en el domo.

1.8.1. Determinación del azimut del domo

Hay cuatro elementos en este problema: El centro de rotación del domo, el centro de gravedad de la montura, la intersección del eje de declinación con el eje óptico del telescopio y la intersección del eje óptico con la línea central de la abertura. Todos estos puntos se los detalla en la figura 1.39, no es más que una proyección isométrica de un observatorio para representar su verdadera geometría en 3D.

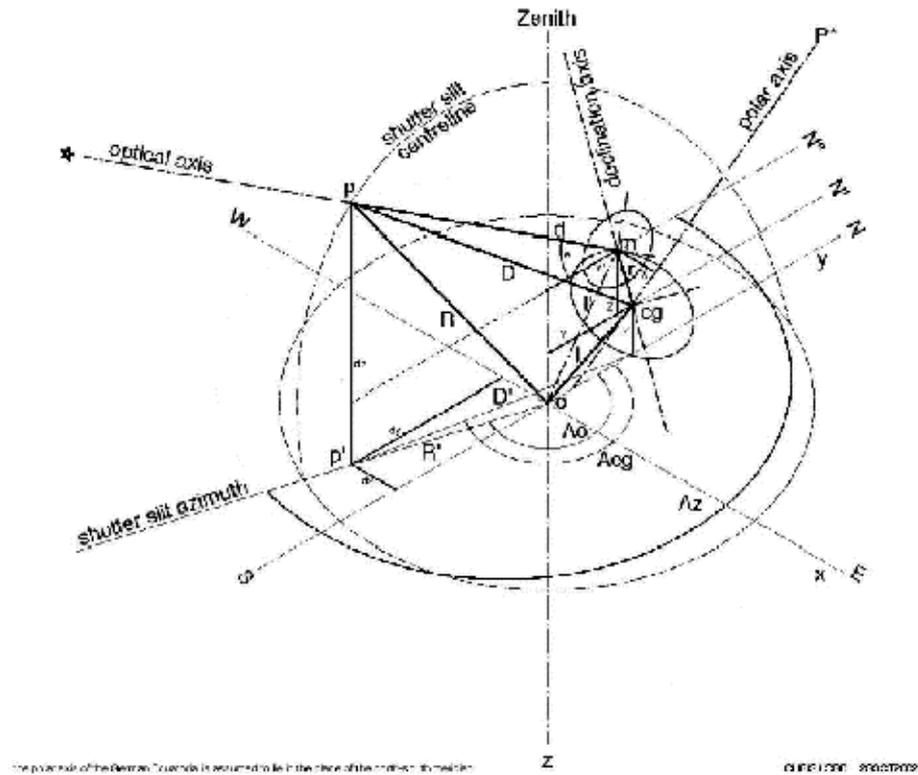


Fig. 1.39: Geometría del azimut de la apertura del domo

Para solucionar este problema se asume que la montura es del tipo ecuatorial, y que su centro de gravedad se encuentra justo sobre el eje Norte – Sur, los cuales coinciden con la disposición del Observatorio de la Alameda.

El eje polar reposa sobre la línea imaginaria Norte – Sur del meridiano, y dicho eje también cruza el centro de rotación del domo.

1.8.2. Sistemas de coordenadas

El sistema primario de coordenadas $[X', Y', Z']$ pertenece al telescopio, con origen en la intersección de los ejes de declinación y óptico del mismo. Se asume que estos ejes son perpendiculares.

El sistema secundario de coordenadas $[X, Y, Z]$ son del centro de gravedad de la montura, lo cual permite que el telescopio se encuentre perfectamente balanceado en todos los ejes (eje mecánico del tubo, eje de declinación y eje polar).

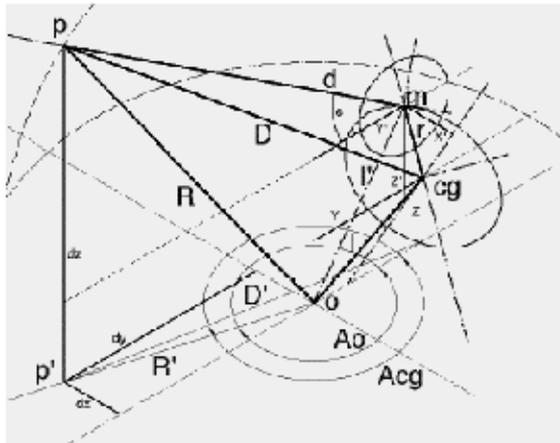
El sistema terciario de coordenadas $[x, y, z]$ pertenece al domo; “z” define el eje de rotación, “y” el eje de meridiano y “x” el eje Este – Oeste. El plano definido por x e y reposa en el plano de la riel del domo.

Antes de entrar en detalles de cómo se estructuran las ecuaciones, deben definirse los términos utilizados en la figura anterior:

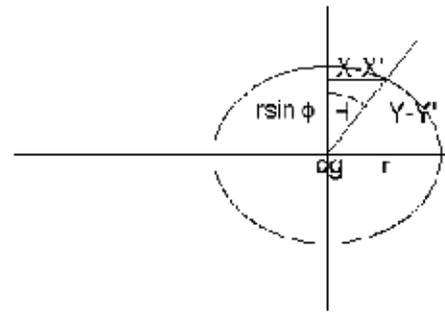
Tabla 1.1: Nomenclatura de términos

A_0	Es el azimuth del domo medido desde el punto cardinal Norte hacia el Este
A_{cg}	Es el azimuth del centro de gravedad medido de la misma forma que el azimuth de domo
A_z	Es el azimuth del telescopio
e	Es la altitud del telescopio o la elevación sobre el horizonte
o	Es el origen del sistema de coordenadas de domo
p	Es el punto en la línea central de la abertura donde se interseca con el eje óptico del telescopio
p'	Es la proyección vertical de “p” en el plano x,y
dx, dy, dz	Son las coordenadas de “p” con respecto a “o”
l	Es la distancia desde el centro de rotación del domo al centro de gravedad (cg)
l'	Es la distancia desde el centro de rotación del domo al punto “m”
m	Es la intersección de los ejes de declinación y óptico del telescopio
r	Es la distancia a lo largo del eje de declinación desde “cg” al eje óptico
r'	Es la proyección vertical de “r” en el plano x,y
d	Es la distancia a lo largo del eje óptico desde “m” hasta “p”
d'	Es la proyección vertical de “d” en el plano x,y
D	Es la distancia más corta desde “cg” hasta “p”
D'	Es la proyección vertical de “D” en el plano x,y
R	Es el radio del domo (asumiendo centro en “o”)
R'	Es la proyección vertical de “R” en el plano x,y
N	Es la dirección azimuth cero de la línea del meridiano coincidente con “o”
N'	Es la dirección azimuth cero de la línea del meridiano coincidente con “cg”
N''	Es la dirección azimuth cero de la línea del meridiano coincidente con “m”
P^*	Es el polo norte celestial

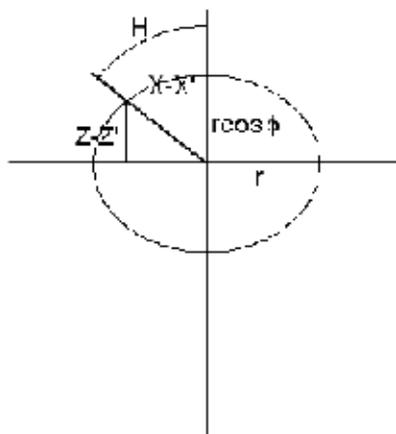
Para aclarar un poco estas definiciones, hay que referirse a la figura 1.40 donde se detallan varias vistas:



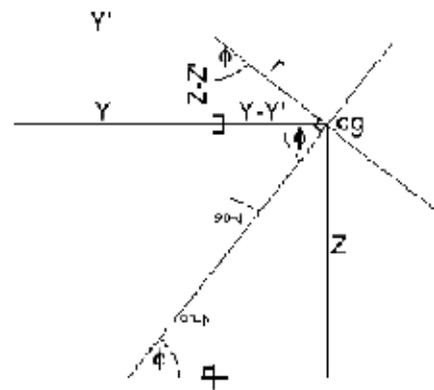
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.40: (a) Acercamiento del esquema de la geometría de domo; (b) vista desde el cenit; (c) vista desde el sur; (d) elevación en el eje polar

- La elipse centrada en el punto “m” es un círculo cuyo centro reposa en un plano perpendicular al eje de declinación.
- La elipse centrada en el punto “cg” es un círculo cuyo centro reposa en el plano perpendicular al eje polar.
- La ubicación de “p” reposa en el plano de la elipse centrado en “m” y definida por la declinación y el ángulo horario (este es el primer punto móvil).
- La ubicación de “m” reposa en el plano de la elipse centrado en “cg” y es definido por el ángulo horario medido hacia el Oeste desde la línea del meridiano.

La distancia entre la intersección de los ejes de declinación y óptico, y la intersección del eje óptico y la línea central de la abertura está definida por la directriz “d”.

Las coordenadas del centro de gravedad (X, Y, Z), el radio del domo y la distancia desde “cg” al eje óptico se pueden medir físicamente. La elevación del eje polar se asume el mismo valor en grados, minutos y segundos que la latitud geográfica del sitio de observación (ϕ).

La convención de signos para las coordenadas X, Y, Z y para el resto de coordenadas es:

- Eje “X” se asume positivo hacia el Este, negativo hacia el Oeste.
- Eje “Y” se asume positivo hacia el Norte, negativo hacia el Sur.
- Eje “Z” se asume positivo sobre el plano x, y dado por el riel del domo, negativo por debajo de dicho plano.

Ahora se puede realizar las diferentes demostraciones trigonométricas que regulan la posición y el desplazamiento del domo relacionado con el movimiento del telescopio. Para la figura 1.40, refiriéndose a la vista desde el cenit, en la elipse centrada en el punto “cg”, el punto de “m” a lo largo de la elipse puede ser utilizado para definir Y’:

$$\frac{(X - X')^2}{r^2} + \frac{(Y - Y')^2}{(r \text{sen} \phi)^2} = 1 \quad (1.2)$$

pero se tiene $X - X' = r \text{sen}(H)$ donde H es el ángulo horario en grados. Por tanto:

$$\begin{aligned} \frac{(r \text{sen}(H))^2}{r^2} + \frac{(Y - Y')^2}{(r \text{sen} \phi)^2} &= 1 \\ \frac{(Y - Y')^2}{(r \text{sen} \phi)^2} &= 1 - \frac{(r \text{sen}(H))^2}{r^2} \\ (Y - Y')^2 &= r^2 \text{sen}^2 \phi - r^2 \text{sen}^2 \phi \text{sen}^2 H \\ \sqrt{(Y - Y')^2} &= \sqrt{r^2 \text{sen}^2 \phi (1 - \text{sen}^2 H)} \\ Y' &= Y - (r \text{sen} \phi \sqrt{1 - \text{sen}^2 H}) \\ Y' &= Y - (r \text{sen} \phi \sqrt{\cos^2 H}) \end{aligned}$$

finalmente:

$$Y' = Y - r \sin \phi \cos H \quad (1.3)$$

donde:

Y' Coordenada de telescopio

Y Coordenada de centro de gravedad

Refiriéndonos a la vista desde el sur, el punto de "m" a lo largo de la elipse se puede utilizar para definir Z' :

$$\frac{(X - X')^2}{r^2} + \frac{(Z - Z')^2}{(r \cos \phi)^2} = 1 \quad (1.4)$$

pero se tiene $X - X' = r \sin(H)$ donde H es el ángulo horario en grados. Por tanto:

$$\begin{aligned} \frac{(r \sin(H))^2}{r^2} + \frac{(Z - Z')^2}{(r \cos(\phi))^2} &= 1 \\ \frac{(Z - Z')^2}{(r \cos(\phi))^2} &= 1 - \frac{(r \sin(H))^2}{r^2} \\ (Z - Z')^2 &= r^2 \cos^2 \phi - r^2 \cos^2 \phi \sin^2 H \\ \sqrt{(Z - Z')^2} &= \sqrt{r^2 \cos^2 \phi (1 - \sin^2 H)} \\ Z' &= Z + \left(r \cos \phi \sqrt{1 - \sin^2 H} \right) \\ Z' &= Z + \left(r \sin \phi \sqrt{\cos^2 H} \right) \end{aligned}$$

finalmente:

$$Z' = Z + r \cos \phi \cos H \quad (1.5)$$

Ahora se tiene todas las ecuaciones para establecer las coordenadas primarias X' , Y' , Z' a partir del ángulo horario del telescopio:

$$\begin{aligned}
X' &= X + r \operatorname{sen} H \\
Y' &= Y - r \operatorname{sen} \phi \cos H \\
Z' &= Z + r \cos \phi \cos H
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

En adelante deben configurarse algunas ecuaciones denominadas ecuaciones de estado, porque definen la relación entre los términos que conocemos y los términos que deseamos encontrar:

$$\begin{aligned}
R^2 &= dx^2 + dy^2 + dz^2 \\
R'^2 &= dx'^2 + dy'^2 \\
l^2 &= X^2 + Y^2 + Z^2 \\
l'^2 &= X'^2 + Y'^2 + Z'^2 \\
D^2 &= (dx - X)^2 + (dy + Y)^2 + (dz - Z)^2 \\
D'^2 &= (dx - X')^2 + (dy + Y')^2 \\
d^2 &= (dx - X)^2 + (dy + Y)^2 + (dz - Z)^2 \\
d'^2 &= (dx - X')^2 + (dy + Y')^2 \\
D^2 &= r^2 + d^2
\end{aligned}$$

Hay que notar el ángulo entre la línea tangente a la elipse “cg”, perpendicular a dz y la línea m – p, que es la elevación del telescopio “e”. La elevación (o altitud) puede ser calculada por la fórmula

$$\cos z = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos H
\tag{1.7}$$

donde “z” es la distancia al cenit. La altitud se mide como $90^\circ - z$.

El azimut del telescopio se calcula de la fórmula

$$\operatorname{sen} z \cos A = \cos \delta \operatorname{sen} H
\tag{1.8}$$

aquí, δ y H son la declinación y el ángulo horario respectivamente; A es el azimut del telescopio, detallado como Az en el primer diagrama.

“H” se deriva de la fórmula $H = LST - \alpha$; donde LST es el tiempo sideral local y es la ascensión recta, ambas deben convertirse a arco segundos.

Ahora considérese el diagrama de la figura 1.41, que muestra la geometría de la directriz “d” y “D” proyectadas en el plano x, y, además la elevación de la directriz “d” desde el plano x, y.

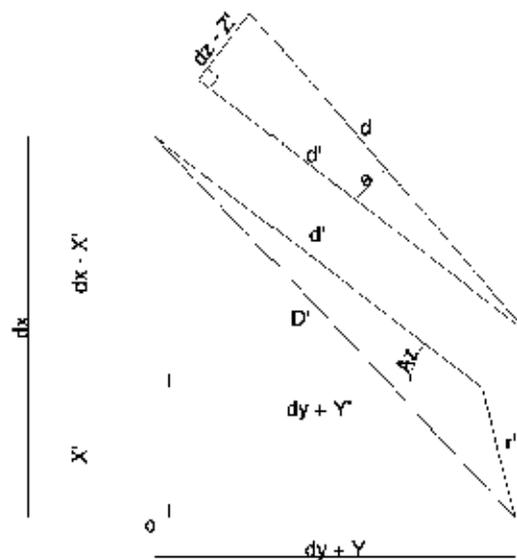


Fig. 1.41: Vista desde el cenit en el plano de D' y d'

De esto:

$$d' = d \cos e$$

$$dx = d' \operatorname{sen} Az + X' = (d \cos e \operatorname{sen} Az) + X'$$

$$dy = d' \cos Az - Y' = (d \cos e \cos Az) - Y'$$

$$dz = d \operatorname{sen} e + Z'$$

pero al tomar en cuenta una igualdad y reemplazar términos:

$$\begin{aligned}
R^2 &= dx^2 + dy^2 + dz^2 \\
&= (d \cos e \cdot \operatorname{sen} Az + X')^2 + (d \cos e \cdot \cos Az - Y')^2 + (d \operatorname{sene} + Z')^2 \\
&= (d^2 \cos^2 e \cdot \operatorname{sen}^2 Az + 2dX' \cos e \cdot \operatorname{sen} Az + X'^2) + (d^2 \cos^2 e \cdot \cos^2 Az - 2dY' \cos e \cdot \cos Az + Y'^2) \\
&\quad + (d^2 \operatorname{sen}^2 e + 2dZ' \operatorname{sene} + Z'^2)
\end{aligned}$$

Reordenando se obtiene:

$$\begin{aligned}
R^2 &= d^2 (\cos^2 e \cdot \operatorname{sen}^2 Az + \cos^2 e \cdot \cos^2 Az + \operatorname{sen}^2 e) + 2d(X' \cos e \cdot \operatorname{sen} Az - Y' \cos e \cdot \cos Az + Z' \operatorname{sene}) \\
&\quad + (X'^2 + Y'^2 + Z'^2)
\end{aligned}$$

Se tiene una ecuación cuadrática de la forma:

$$\begin{aligned}
&(\cos^2 e \cdot \operatorname{sen}^2 Az + \cos^2 e \cdot \cos^2 Az + \operatorname{sen}^2 e)d^2 \\
&+ 2(X' \cos e \cdot \operatorname{sen} Az - Y' \cos e \cdot \cos Az + Z' \operatorname{sene})d \\
&+ (X'^2 + Y'^2 + Z'^2 - R^2) = 0
\end{aligned} \tag{1.9}$$

pero

$$l^2 = X'^2 + Y'^2 + Z'^2$$

simplificando:

$$\begin{aligned}
\operatorname{sen}^2 Az &= 1 - \cos^2 Az \\
\operatorname{sen}^2 e &= 1 - \cos^2 e
\end{aligned}$$

por sustitución:

$$\begin{aligned}
\cos^2 e \cdot \operatorname{sen}^2 Az + \cos^2 e \cdot \cos^2 Az + \operatorname{sen}^2 e &= \cos^2 e (1 - \cos^2 Az) + \cos^2 e \cdot \cos^2 Az + (1 - \cos^2 e) \\
&= \cos^2 e - \cos^2 e \cdot \cos^2 Az + \cos^2 e \cdot \cos^2 Az + 1 - \cos^2 e \\
&= 1
\end{aligned}$$

y poniendo:

$$L = X' \cos \delta \cdot \text{sen} Az - Y' \cos \delta \cdot \cos Az + Z' \text{sen} \delta$$

$$M = l^2 - R^2$$

$$d^2 + 2Ld + M = 0$$

arroja las soluciones:

$$d_1 = -L - \sqrt{L^2 - M}$$

$$d_2 = -L + \sqrt{L^2 - M}$$

pero "d" es siempre positiva,

$$\therefore d = \left(\sqrt{L^2 - M} \right) - L$$

Una vez que la longitud de la directriz "d" se ha determinado se vuelve posible hallar dx, dy, dz y por tanto el azimut del domo:

$$A_0 = \arctan \frac{dx}{dy} \tag{1.10}$$

Los ángulos deben cumplir las reglas de los cuatro cuadrantes:

Cuadrante 1

$$Az = \alpha \cos \left\{ \frac{(\cos \delta \cdot \text{sen} H)}{\text{senz}} \right\} - \frac{\pi}{2}$$

$$X'_{(este)} = X + r \text{sen} \left(H + \frac{3\pi}{2} \right)$$

$$X'_{(oeste)} = X + r \text{sen} \left(H + \frac{\pi}{2} \right)$$
(1.11)

Cuadrante 2

$$\begin{aligned}Az &= \frac{3\pi}{2} - a \cos\left\{\frac{(\cos\delta \cdot \text{sen}H)}{\text{senz}}\right\} \\X'_{(este)} &= X + r \text{sen}\left(H + \frac{\pi}{2}\right) \\X'_{(oeste)} &= X + r \text{sen}\left(H + \frac{3\pi}{2}\right)\end{aligned}\tag{1.12}$$

Cuadrante 3

$$\begin{aligned}Az &= \frac{3\pi}{2} - a \cos\left\{\frac{(\cos\delta \cdot \text{sen}H)}{\text{senz}}\right\} \\X'_{(este)} &= X + r \text{sen}\left(H + \frac{\pi}{2}\right) \\X'_{(oeste)} &= X + r \text{sen}\left(H + \frac{3\pi}{2}\right)\end{aligned}\tag{1.13}$$

Cuadrante 4

$$\begin{aligned}Az &= \frac{3\pi}{2} + a \cos\left\{\frac{(\cos\delta \cdot \text{sen}H)}{\text{senz}}\right\} \\X'_{(este)} &= X + r \text{sen}\left(H + \frac{3\pi}{2}\right) \\X'_{(oeste)} &= X + r \text{sen}\left(H + \frac{\pi}{2}\right)\end{aligned}\tag{1.14}$$

1.8.3. Desarrollo de un algoritmo para rotación sincronizada de domo a partir de las ecuaciones

El algoritmo necesita valores constantes que deben ser ingresados: X, Y, Z, R, r; junto al valor en grados de la latitud del sitio (ϕ), y además debe adquirir en forma periódica o en tiempo real de Az, e y H.

Luego del ingreso de estos valores, ha de incluirse en el script el cálculo de cada ecuación obtenida con anterioridad para con aquellos datos, junto con los captados en tiempo real por los sensores se proceda a las acciones de control respectivas.

El presente cálculo se presta para observatorios en general, sin embargo es aplicable la geometría para determinadas marcas constructoras que establecen sus parámetros, pero de todas maneras satisface algunos de los conceptos generales. El siguiente es un ejemplo de configuración de geometría de domo de la compañía Software Bisque, propietarios de la marca registrada de software para automatización de observatorios; para control de domo a base del paquete AutomaDome:

1.8.4. Caja de diálogo “Geometría”

Esta caja de diálogo permite especificar la geometría del domo, telescopio y otros instrumentos. La figura 1.42 muestra una ventana dispuesta para ingresar datos de configuración en la geometría de domo.



Fig. 1.42: Ventana de configuración de geometría de domo

En la figura 1.43 se muestra una disposición geométrica similar a la de la figura 1.39 pero incluye un croquis de la estructura mecánica de la montura y el telescopio dentro del domo

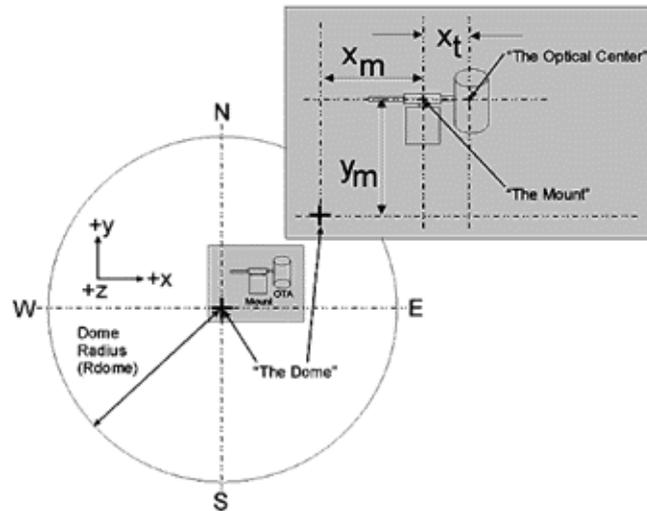


Fig. 1.43: Disposición geométrica de parámetros de telescopio y montura

A base de la disposición geométrica parten los parámetros de geometría para los dispositivos antes mencionados:

- **Roll Axis Elevation** (Elevación del eje polar): Se refiere al eje polar en un telescopio con montura ecuatorial, medido en radianes. Equivale al eje azimutal en una montura Alt – az especificado a través del argumento ϕ , el cual es la elevación por encima del horizonte en la dirección Norte del eje polar. Para una montura ecuatorial, ϕ es igual a la latitud geográfica. Excepto en la montura Alt – az la inclinación del eje polar define el “Norte” para el domo. Si el eje polar no está alineado Norte – Sur, entonces se lo debe ajustar.
- **Dome radius** (Radio del domo): Distancia desde centro de rotación del domo a riel (se asume un domo de forma hemisférica o similar).
- **Offset of mount from dome** (Distancia entre montura y domo): Desplazamiento especial ó distancias entre montura y domo, en cada eje. Suponer centro de domo como centro del sistema. La montura es aquel punto fijo a lo largo del eje polar que reposa lo más cerca del telescopio.
- **[Xm, Ym, Zm]** corresponden a los ejes Este – Oeste, Norte – Sur y cenit, respectivamente. Se describe cada parámetro como:

- **Xm** = Distancia desde la línea central del domo (Norte – Sur) hasta su paralela en la montura (se relaciona con la intersección mecánica de los ejes del telescopio).
- **Ym** = Distancia desde la línea central del domo (Este – Oeste) hasta su paralela en la montura.
- **Zm** = Distancia vertical desde el piso del domo al telescopio.
- **Offset of telescope from mount** (Distancia entre telescopio y montura): Tiene como parámetros [Xt, Yt]; el punto de montura ya se especificó, el “telescopio” es aquel punto a lo largo del eje de declinación que reposa lo más cerca del eje óptico.
- **Xt** = Distancia de la línea central (Norte – Sur) de la MONTURA al centro óptico del telescopio.
- **Yt** = Distancia de la línea central (Este - Oeste) de la MONTURA al centro óptico del telescopio.
- **Offset of optical axis from telescope** (Distancia entre eje óptico y telescopio): Desplazamiento del eje ÓPTICO respecto al eje MECÁNICO del tubo del telescopio. Definido por el parámetro [Y0]. Es la intersección de este eje óptico con el eje de la abertura del domo el que define el azimut a ser calculado para el movimiento del domo.

El azimut sigue una convención normal (el valor se incrementa en forma positiva desde el punto cardinal Norte a 0° hasta 90° en el punto cardinal Este. Se desplegará un valor de 0° en el cenit). Pequeñas “correcciones de apuntamiento”, no linealidades, pequeñas no – perpendicularidades y desalineaciones son ignoradas.

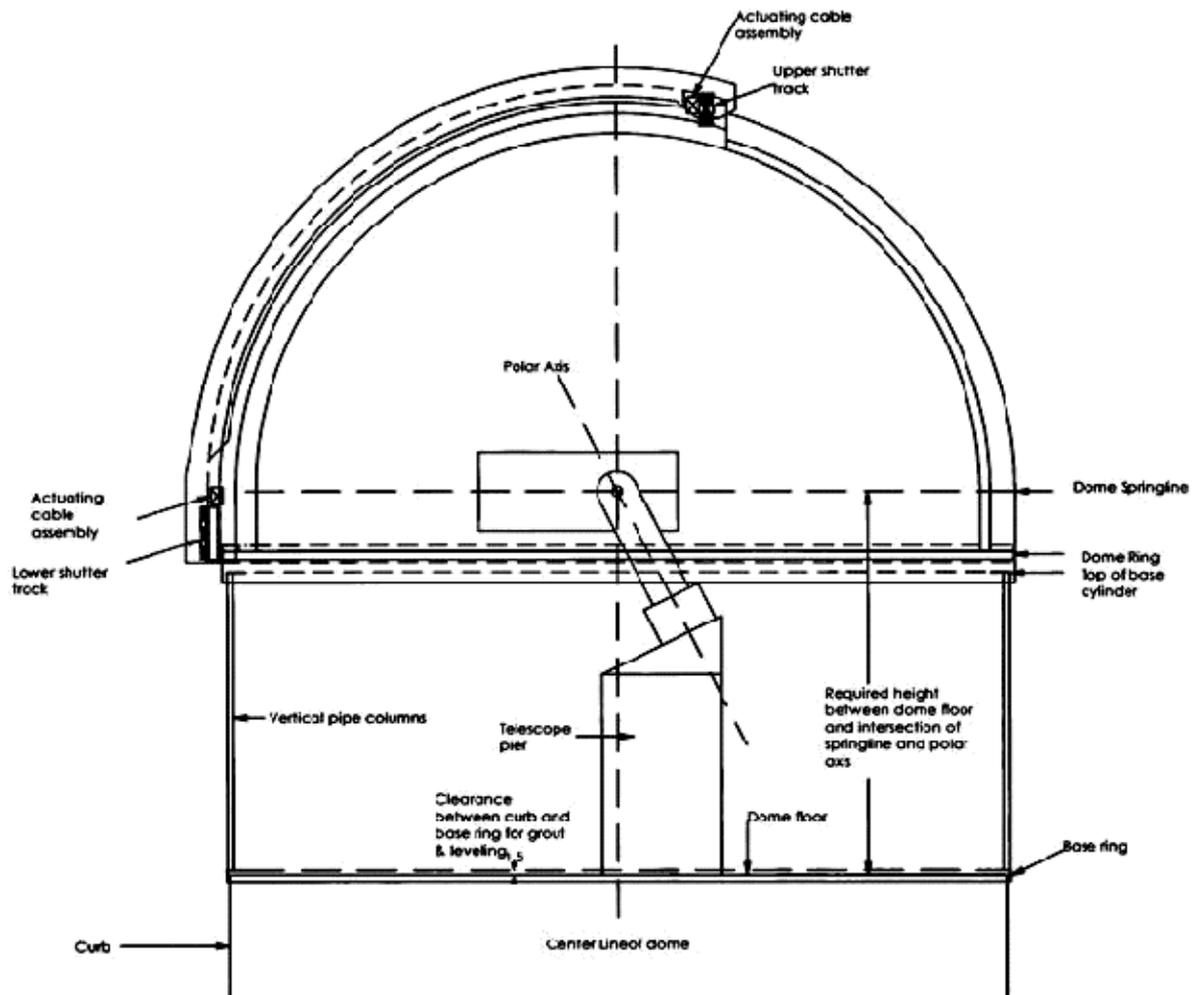


Fig. 1.44: Plano del domo y del telescopio con su montura en un observatorio

En la figura se presenta un diagrama de la estructura básica recomendada para un observatorio, y se visualiza en parte la geometría al que está sujeto. Coincide el eje de centro de domo con el eje mecánico de la montura del telescopio; tiene cierta inclinación por la latitud geográfica del observatorio pero demuestra la aplicación de los parámetros geométricos.

1.9. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

En la época de la presidencia del Dr. Gabriel García Moreno, se planificó y construyó el Observatorio Astronómico de la Alameda, con la intención de desarrollar estudios de astrometría y posicionamiento de estrellas, incluyendo la determinación exacta del tiempo; escogieron en ese entonces una ubicación geográfica en las afueras de Quito. Se conoce

que quienes laboraban en el Observatorio en sus inicios (científicos de esa época) arribaban desde el “centro” de la ciudad y permanecían toda la noche en ese sitio, pernoctando en las torres cortiguas a la principal; esto nos da una idea del crecimiento exponencial de la ciudad de Quito, que en nuestros días ha hecho que el Observatorio, en su misma ubicación de hace 134 años ya no se encuentre en las afueras, sino en pleno centro de la urbe.



Fig. 1.45: Fotografía del Observatorio Astronómico de la Alameda de inicios de siglo XX

Según los datos obtenidos por el mismo Observatorio Astronómico de la Alameda, arrojan los siguientes datos de posición geográfica y clima:

- Latitud: $0^{\circ} 12' 53'',70$ Sur
- Longitud: $78^{\circ} 30'09'',15$ Oeste
- Altura: 2 818,05 m.s.n.m.
- Temperatura media del aire: 13.2°C
- Humedad relativa media: 75%
- Presión atmosférica media: 547,7 mm.
- Densidad del aire: 0.001257 g/cm



Fig. 1.46: Ubicación del Observatorio en el parque de la Alameda, extraído de Google Earth

El dato más relevante es la latitud, muy cercana a cero; de hecho el Observatorio se encuentra a sólo 24 Km. de la línea ecuatorial, con lo que para efectos de cálculo astronómico ese pequeño valor se lo toma en cuenta, pero para nuestro propósito de control se asume latitud cero

Es admirable la elevada precisión en los cálculos que los científicos de aquella época resolvieron para la construcción del Observatorio, tal es así que mapas satelitales lo comprueban, al coincidir los puntos cardinales con las cuatro alas del edificio:



Fig. 1.47: Comparativa de la edificación construida hace 134 años y su casi perfecta alineación con los puntos cardinales

Pero, ¿cómo depende la forma en que es observado el cielo con la situación geográfica? Se ha indicado que la posición que ocupa nuestro país es una de las mejores para observación astronómica, en otras latitudes se ve sólo cierta parte de la totalidad de la esfera celeste sin embargo el porqué es una incógnita.

Suponiendo que se tiene a tres observadores: el observador A se ubica en el Polo Norte (90°), el observador B está e una latitud 45° Norte y el observador C se encuentra en la línea ecuatorial (0°). En la siguiente figura se representa a los observadores en sus respectivas ubicaciones geográficas y la esfera celeste con sus hemisferios cubriendo a la Tierra.

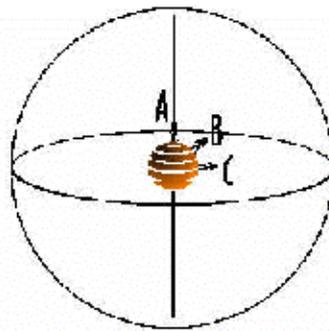


Fig. 1.48: Representación de observadores a diferentes latitudes geográficas

En la figura 1.49 el observador A tiene el polo Norte celestial directamente sobre él. Sólo podrá observar las estrellas del hemisferio Norte de la esfera celeste, que simplemente giran alrededor del observador. El horizonte de éste observador es el ecuador celeste (plano de observación). La flecha indica la dirección de giro de la esfera celeste.

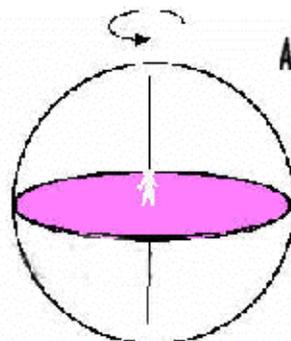


Fig. 1.49: Observador situado en el Polo Norte

El observador C en la figura 1.50 tiene el ecuador celeste directamente en el cenit. Los polos celestiales están a lados opuestos del horizonte; la ubicación le permite al observador observar por igual los hemisferios Norte y Sur de la esfera celeste, con las estrellas “moviéndose” de Este a Oeste. El eje de los polos celestiales atraviesa el plano de observación.

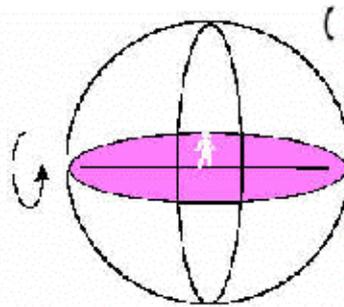


Fig. 1.50: Observador situado en el Ecuador

El observador B de la figura 1.51 se ubica en un punto intermedio entre A y C. El ángulo entre el cenit en esa ubicación y el horizonte será de 45° ; podrá apreciar buena parte del hemisferio Norte y un poco del hemisferio Sur. El recorrido de las estrellas seguirá una trayectoria oblicua; cualquier latitud entre 1° y 89° hacia Norte ó hacia Sur tendrán la misma característica, el ángulo antes mencionado será siempre igual al de la latitud geográfica del sitio.

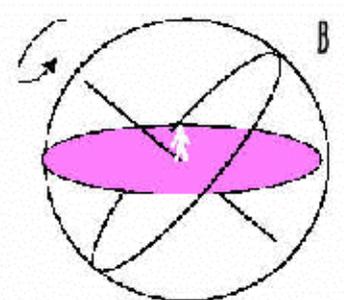


Fig. 1.51: Observador a latitud 45° Norte

1.10. CLASES DE TIEMPO

El tiempo es catalogado como una de las magnitudes fundamentales, junto a la longitud y a la masa; existen métodos astronómicos para determinar el tiempo:

- **Tiempo medio:** Conocido también como tiempo solar medio, define un día solar de duración constante a lo largo del año, puesto que el sol en su movimiento aparente alrededor de la Tierra no es uniforme, llevando a desfases si se lo llevara de forma exacta (la diferencia de duración de las 24 horas de un día en las distintas estaciones puede llegar a ser de 16 minutos); para esto se adoptó el patrón conocido como “sol medio” un punto ficticio que compensa los adelantos y retrasos del sol verdadero para mantener invariable la duración del día. El tiempo así definido tiene intervalos de tiempo conocidos por horas, minutos y segundos. Es la hora, minuto y segundos que llevamos comúnmente en nuestros relojes.
- **Tiempo sidereal:** Es una medición del tiempo más exacta, aplicada en Astronomía, ya que se basa en una aproximación de la posición de las estrellas. Tiene de hecho un punto de referencia (Aries) o equinoccio de primavera. Un día sidereal es el tiempo que le toma a una estrella reaparecer en la misma posición al día siguiente. Sus unidades son la hora, minuto y segundo siderales y los relojes regulados para este tiempo son los relojes sidéreos. La hora sidereal local es el tiempo transcurrido (ángulo horario) desde que el punto de Aries pasó por el meridiano de esa localidad (ese instante serían las 00h00min00seg). Las equivalencias son: 1 día medio solar = 0.9973 días medios siderales, ó 23h56min04.09seg de tiempo sidereal medio. En la figura 1.52 una perspectiva geocéntrica (representación del movimiento aparente de las estrellas con la Tierra como centro) del movimiento anual del sol. La figura 1.52 muestra una perspectiva geocéntrica, que es la referencia de los puntos inicial y final del tiempo sidereal

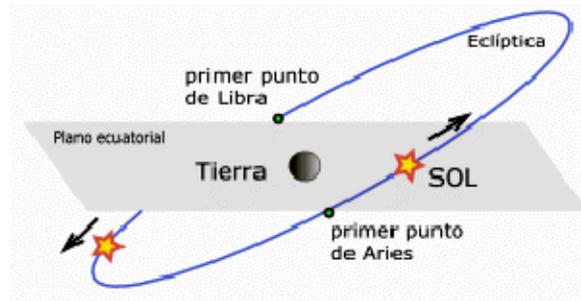


Fig. 1.52: Explicación gráfica del tiempo sideral medio

El primer punto de Aries se lo conoce también como equinoccio vernal. Por la definición de tiempo solar medio, el tiempo que el Sol tarda en volver a su punto más alto en el cielo es de 24 horas sin embargo las estrellas tienen un movimiento aparente ligeramente distinto. La órbita de la Tierra alrededor del Sol provoca que el Sol cumpla con el anterior enunciado girando una distancia angular extra (1° por día aprox.) para alcanzar el cenit. Este desfase es apreciable para astros relativamente cercanos como el Sol, pero es mínimo para el resto de estrellas que conforman la esfera celeste.

El tiempo sidéreo local (TSL) u hora sideral local es la ascensión recta (A) de un astro más el ángulo horario (H) de dicho astro:

$$TSL = H + A \quad (1.15)$$

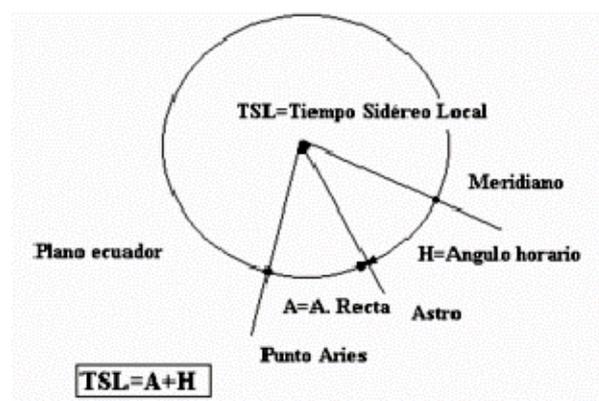


Fig. 1.53: Relación entre tiempo sideral local (TSL), ángulo horario (H) y ascensión recta (A)

El tiempo sidéreo se usa en observatorios astronómicos por la facilidad que supone a la hora de determinar qué objetos astronómicos serán visibles en un momento dado. Los

objetos se sitúan en el cielo nocturno empleando la ascensión recta y declinación relativas al ecuador celeste (algo análogo a la longitud y latitud en la Tierra), y cuando el tiempo sidéreo de un objeto es igual a su ascensión recta, se encontrará cruzando el meridiano ($H=0$) en el punto más alto del cielo y será además el mejor momento para realizar las observaciones. O dicho de otro modo: en el instante de la culminación de una estrella su ascensión recta nos da el tiempo sidéreo, o a la inversa, conocido el tiempo sidéreo tenemos la ascensión recta de la estrella. La figura 1.54 indica una perspectiva del programa “Stellarium” simulando a un astro a su paso por el origen de coordenadas en ascensión recta. Luego, en la figura 1.55 está el mismo astro cruzando por el cenit ó meridiano, y por último la figura 1.56 detalla la puesta del astro en el extremo Oeste.



Fig. 1.54: Astro ubicado cerca al origen de ascensión recta ($H = -6h\ 0min\ 0sec$)

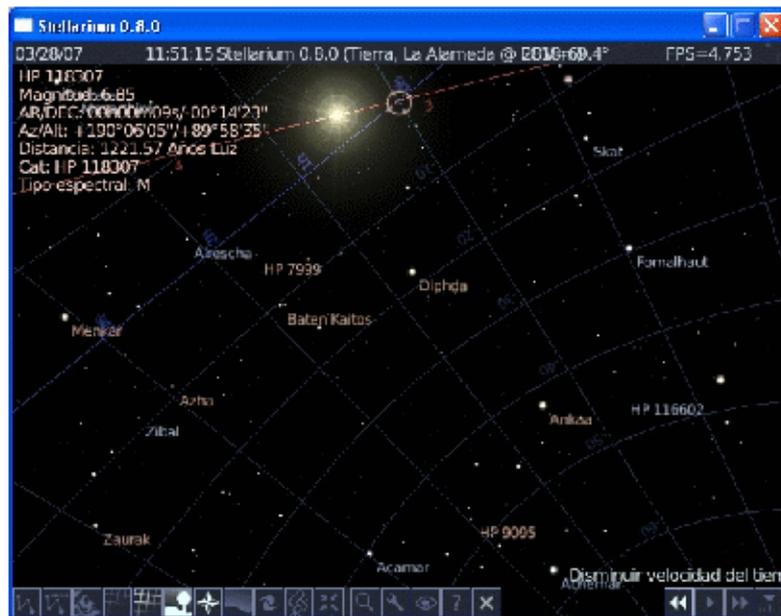


Fig. 1.55: El mismo astro cruzando el meridiano (H = 0h 0min 0seg)

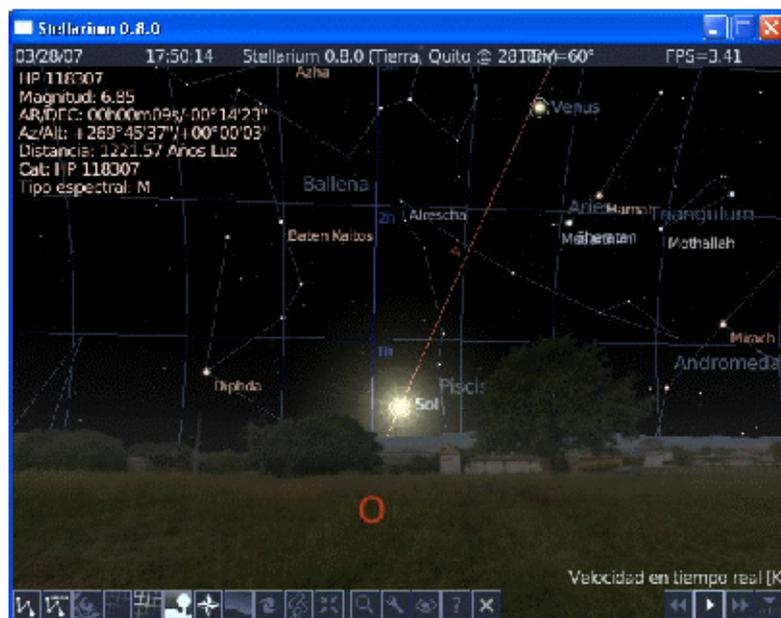


Fig. 1.56: El astro se está poniendo hacia el Oeste (H = 6h 0min 0seg)

1.11. DATOS QUE IDENTIFICAN A LOS ASTROS

Los programas especializados en Astronomía poseen casi todos los datos referentes a cada estrella, planeta, cuerpo celeste, etc. que se encuentre en la esfera celeste. La información es compilada con frecuencia en catálogos, sin embargo dichos programas hacen factible

una visualización precisa y rápida de un determinado cuerpo celeste, como en la figura 1.57:

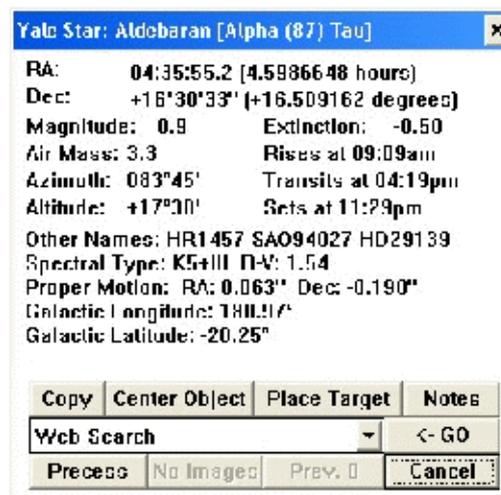


Fig. 1.57: Ficha de catálogo con los datos principales de un astro tabulados

El astro, identificado en su nombre común como “Aldebarán” muestra en esta ficha su denominación astronómica (Alpha 87 Tau), y los datos de importancia relacionados con el seguimiento de astros son:

- **RA:** coordenada de ascensión recta en horas, minutos y segundos.
- **DEC:** coordenada de declinación en grados, minutos y segundos.
- **Magnitude:** Magnitud o brillantez aparente
- **Azimuth:** coordenada de azimut en grados, variante respecto al tiempo.
- **Altitude:** coordenada de altitud, también variante respecto al tiempo.
- **Rises at:** es la hora, minuto y segundo del día en que el astro aparece en el horizonte.
- **Sets at:** hora, minuto y segundo del día en que el astro se oculta o desaparece del horizonte.
- **HA:** ángulo horario, no está incluido en la ficha pero cuenta como dato importante en la determinación de coordenadas en plena observación.

Precisamente es con las coordenadas de ascensión recta y declinación que es posible seleccionar un cuerpo celeste y apuntar con el telescopio hacia él, una vez logrado esto

sólo se necesita el cálculo del ritmo de seguimiento en los ejes del telescopio para obtener una exposición continua (que el astro no se salga de la mira del telescopio por un tiempo prolongado).

1.12. SITUACIÓN ACTUAL DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA ALAMEDA

En las instalaciones del Observatorio trabajan cerca de 12 especialistas provenientes casi en su totalidad de la Escuela Politécnica Nacional, desde su Departamento de Física y estudian los diversos fenómenos vinculados a la Astrofísica, Meteorología, Sismología y a la Astronomía por supuesto (observación de astros). En las ramas de Meteorología y Sismología cumplen actividades de registro sólo para uso interno, debido a que estas ramas en gran escala de divulgación fueron tomadas por el Instituto Geofísico, adscrito también a la Politécnica pero independiente del Observatorio. Por lo que las ramas de la Astronomía y Astrofísica se convierten entonces en las que el Observatorio pone mayor énfasis, donde la investigación en el tema tiene mayor nivel.

Dentro de estas dos ramas, esta dependencia de la Politécnica tiene abiertas al público tres subdependencias: Museo, Biblioteca y Observatorio astronómico, en las dos primeras se dispone muestras de contenido histórico del funcionamiento de esta institución en el caso del museo e información de referencia en la biblioteca. La función de observatorio permite a público en general con o sin experiencia en la Astronomía a realizar observación nocturna de cuerpos celestes, con la tutela de los especialistas que laboran en el Observatorio.

Es lógico que el observatorio se convierte en la principal atracción de esta institución, a pesar del tiempo transcurrido desde que el telescopio ecuatorial Merz que dispone el observatorio empezó a operar no ha mermado sus condiciones, aún se puede obtener una visión relativamente clara del cielo nocturno y sus astros, sin embargo existen ciertos limitantes que impiden una sesión de observación ideal:

- El clima de Quito es muy cambiante y con tendencia a cielo nublado la mayor parte del año, con excepción de la temporada de verano.
- Aún obteniendo con suerte una noche totalmente despejada para realizar observaciones, los edificios aledaños al observatorio en cierta proporción obstruyen el campo de visibilidad del telescopio. Estos edificios de paso también contribuyen con contaminación lumínica.
- El proceso de observación puede impulsarse de forma manual, pero sólo lo puede hacer personal con conocimientos en Astronomía, de todas formas hacerlo en forma manual es incómodo y no se alcanza la precisión adecuada.



Fig. 1.58: Fotografía del telescopio ecuatorial Merz del Observatorio con su cúpula alrededor y escalera

Con respecto a esta última limitante, al apreciar en la imagen anterior el espacio físico reducido del sitio en el que está instalado el telescopio hace más difícil aun desarrollar para una sola persona la observación; lo que se ha hecho hasta ahora es disponer de una persona dando vuelta la manivela que mueve la cúpula o domo según lo requiera una segunda persona moviendo el telescopio, usando un mapa del cielo para hallar determinado astro a través de un pequeño telescopio de menor potencia (buscador) paralelo al telescopio principal, hasta que la abertura del domo esté alineada con la mira del telescopio, de allí es inmovilizado el eje de declinación con un seguro y el eje de ascensión recta queda libre para seguir al astro, como la etapa de motorización de este eje del telescopio está en fase de

prueba no se tiene un movimiento uniforme de este eje, el astro se sale de la mira en cuestión de segundos y se debe corregir a mano, lo cual resta precisión a la observación. Para evidenciar este problema en la figura 1.59 se muestra la vista de la Luna tan solo en el telescopio buscador, con un círculo oscuro como marca de centro, el astro sale de la alineación de dicho círculo por efecto del movimiento aparente de la esfera celeste.

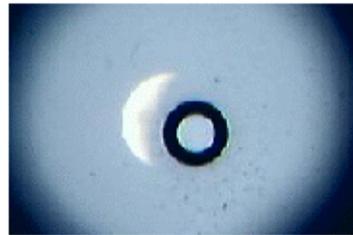


Fig. 1.59: Vista del ocular en el telescopio buscador (auxiliar) del telescopio principal

Hay que señalar las deficiencias estructurales, eléctricas y otras como:

- Piso de madera del observatorio deteriorado.
- Portezuelas de acceso dañadas.
- Pobre iluminación dentro de la cúpula del observatorio.
- Instalaciones eléctricas en mal estado.
- Oxidación y desgaste de la estructura metálica, engranes, ruedas y sistemas de apertura de compuertas de la cúpula.
- Falta de seguridades y de protección contra incendios.

Contra las limitantes de clima y edificios circundantes no se puede hacer mayor cosa, pero si favorece el clima y se dispone la apertura de compuertas en la cúpula de tal forma que sea mínima la contaminación lumínica proveniente de edificios cercanos, se pueden minimizar sus efectos. La limitante que se debe atacar es a la operación manual del telescopio, que con la ayuda de dispositivos electrónicos y mecánicos hace más fluida y eficiente una observación, y lograría el propósito de que una sola persona pueda realizar observaciones manejando el movimiento de telescopio y cúpula en un solo dispositivo de control, como en los grandes Observatorios Astronómicos alrededor del mundo.

1.13. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE TELESCOPIOS EN SEGUIMIENTO DE ASTROS

1.13.1. Configuración de coordenadas de telescopio y alineación

Existe una marcada diferencia entre los tipos de monturas utilizadas en telescopios. Cabe analizar a los dos tipos de monturas estudiados, siendo además los más comunes respecto a configuración de coordenadas que regirá el telescopio. La montura alt – azimutal requiere de movimiento simultáneo en dos ejes para seguir a un astro. En la montura ecuatorial, el eje polar debe alinearse con el eje de rotación terrestre (la referencia en la esfera celeste es la estrella Polaris) dando al telescopio la declinación adecuada al astro que se desea observar, y entonces debe girar tan solo en ése eje, contrarrestando la rotación de la Tierra, para seguir el movimiento aparente de un astro.

Si bien fue detallado el análisis de geometría de domo, evidencia tener demasiados parámetros a tomar en cuenta, la siguiente gráfica incluye sólo los más importantes por lo menos referente a telescopios con montura ecuatorial

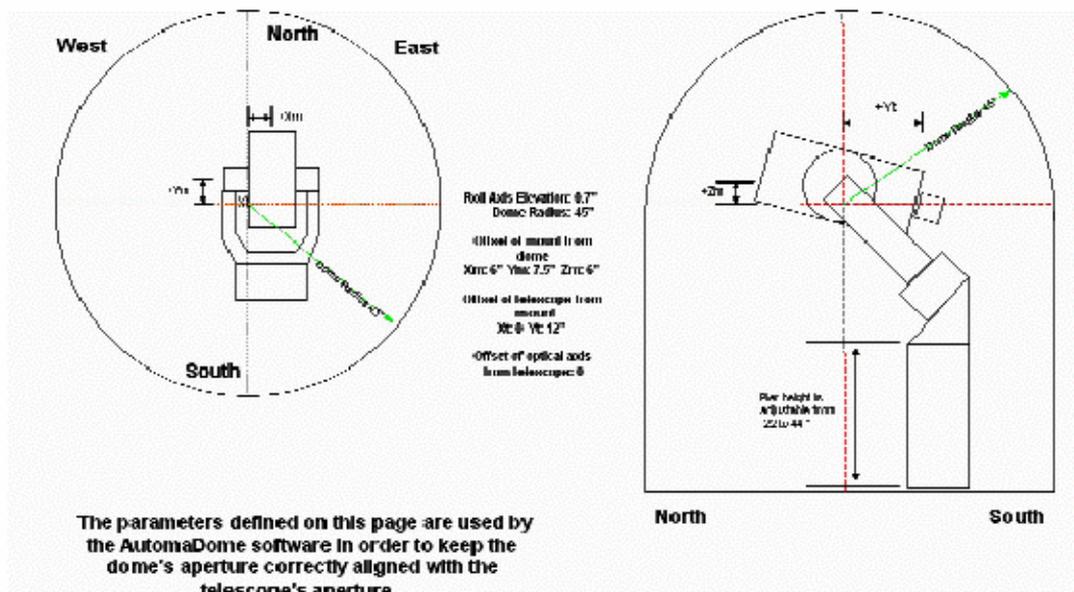


Fig. 1.60: Parámetros principales de geometría de domo y de telescopio en montura ecuatorial para astronomía por control automático

Una vez que se simplifica la geometría de domo a tres ó cuatro parámetros fundamentales, se adapta entonces a lo que buscamos en las coordenadas y alineación apropiadas para la montura de nuestro telescopio, al ir del sitio de observación hacia la esfera celeste. La figura 1.61 muestra una representación simple de los parámetros de geometría de domo.

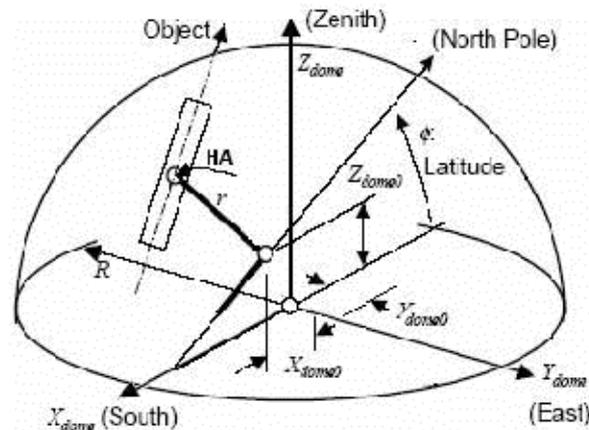


Fig. 1.61: Parámetros de geometría de domo pero esquematizados, con las longitudes y ejes del sistema dispuestos para alineación y determinación de coordenadas.

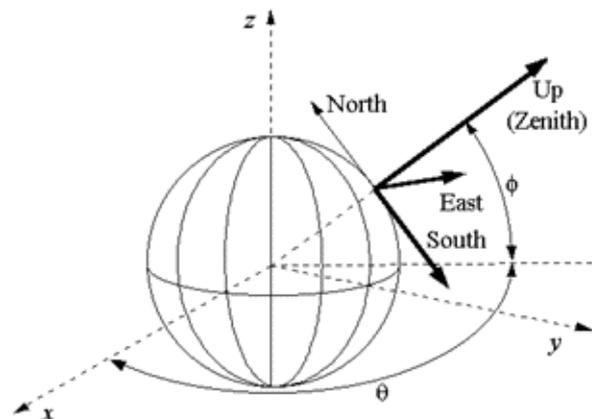


Fig. 1.62: Diagrama vectorial de los puntos cardinales terrestre y celestial

En la figura 1.62 los vectores en trazo grueso representados sobre la esfera terrestre se proyectan hacia la esfera celeste e indican el sentido y dirección de los puntos cardinales para la orientación de telescopio en la ubicación geográfica del observador

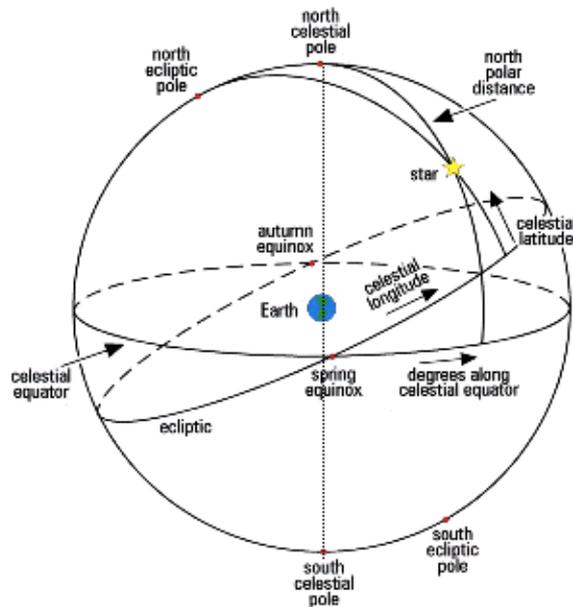


Fig. 1.63: Representación del eje polar en la esfera celeste

El eje polar en la figura 1.63 (línea punteada vertical con sus extremos en los polos celestiales norte y sur) se proyecta entonces atravesando los polos geográficos de la Tierra, en la gráfica anterior el vector Norte debe “apuntar” hacia el polo norte celestial y es el que permite la alineación de un telescopio. La alineación del eje polar, previo su nivelación al suelo, es el primer paso en el ajuste de un telescopio con montura ecuatorial; y en el caso de telescopios computarizados se ingresa además información como zona horaria, fecha, latitud y longitud geográfica, tipo y velocidad de seguimiento (tracking), coordenadas de objeto, coordenadas de telescopio, auto-sincronización, etc. Estos son los parámetros más importantes que rigen a la mayoría de observatorios astronómicos automatizados.

1.13.2. Diagrama de bloques de un observatorio astronómico

En algunos observatorios avanzados se encuentran tantos bloques funcionales que hacen de su representación en diagrama de bloques amplia y diversa. Esto depende de las prestaciones básicas y auxiliares acopladas como la comunicación con una PC local ó remota, el control manual y/o automático, el sensado de variables, etc. Pero es posible idear una forma general en la que casi todos los observatorios estén inmersos, y se muestra en el diagrama de bloques de la figura 1.64.

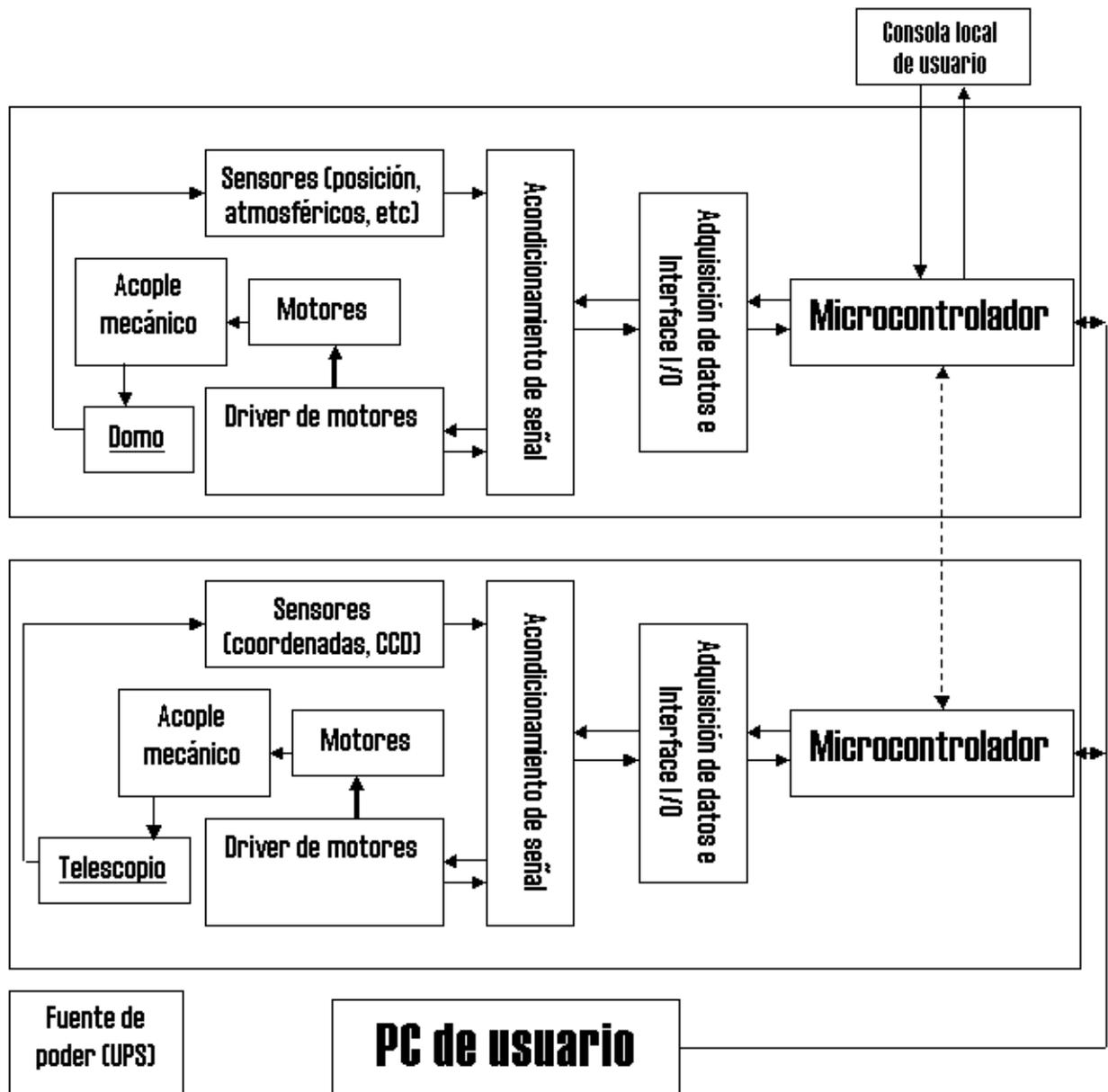


Fig. 1.64: Diagrama de bloques de un observatorio astronómico automatizado

El sistema de control de observatorio astronómico se asemeja a un diagrama de control existente en un proceso automatizado de cualquier índole, lo cual facilita los propósitos de la Instrumentación a la Astronomía. Por ejemplo, el diagrama de bloques de un observatorio astronómico con algunos elementos extras, pero enmarcado dentro de la configuración básica, mostrado en la figura 1.65:

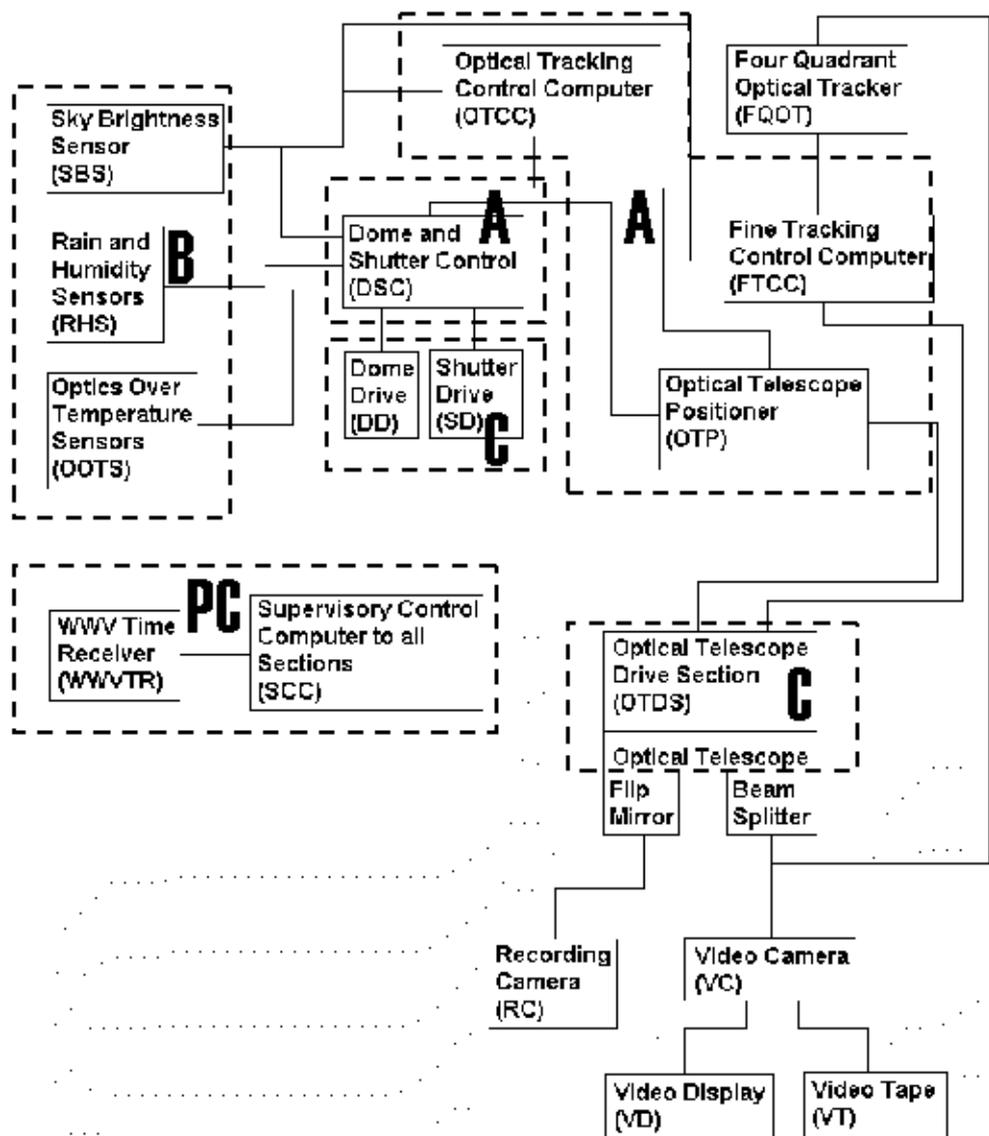


Fig. 1.65: Diagrama del observatorio La estrellita - (A) Etapas de control de cada dispositivo; (B) Sensores; (C) Drivers de motor; (PC) Computador personal de supervisión y control

Los diagramas pueden incluir dispositivos adicionales como manejo de cámaras, grabación de imagen, sistemas de emergencia, unidades de almacenamiento masivo, entre otros. Para captar una parte de este diagrama esquemático de un observatorio, extrayendo el bloque del sistema de control de domo, se puede detallar la estructura y ubicación de sus componentes

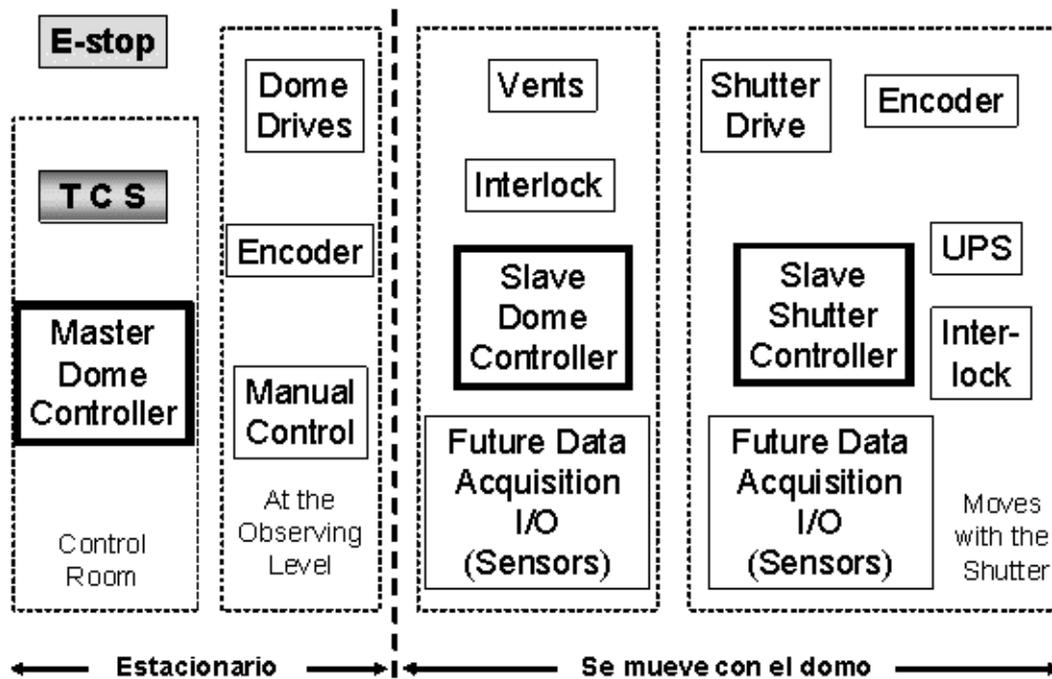


Fig. 1.66: Diagrama de bloques del sistema de control y drivers de motor del domo

En el diagrama de la figura 1.66 se perciben algunas variantes, sujetas a las condiciones de cada domo o de cada observatorio; las flechas en la parte inferior y que dividen el bloque en dos por la línea punteada diferencian la parte estacionaria (izquierda) de la parte del bloque que se mueve con el domo (derecha), aquí se tiene al controlador de domo, el de mayor prioridad se encuentra en la parte estacionaria (Master) y los de menor en la parte derecha (Slave); los sensores ubicados tanto en la parte estacionaria como en la móvil (Encoders) además de un control manual disponible en la parte estacionaria para el usuario desde el interior del observatorio; los manejadores de potencia o “drivers” se incluyen en ambas partes. Los demás bloques representan a la etapa de adquisición de datos y de expansión, seguros, software de control, fuente UPS y protecciones como el e-stop ó parada de emergencia.

1.14. INTERFACE GRÁFICA DE SOFTWARE VINCULADO A CONTROL DE TELESCOPIOS Y DOMO

El software de PC diseñado para Astronomía faculta la operación automatizada del observatorio completo, con posibilidad de supervisión, generación de reportes, calibración automática. En la figura 1.67 se muestra la ventana principal del programa “The Sky 6” de

la compañía Software Bisque, mostrando la barra de menú y el recuadro negro proporciona una vista virtual del cielo con los diferentes astros en él; el puntero del ratón accede a determinado astro para señalarlo, obtener sus coordenadas y mover el hardware del observatorio para observarlo.



Fig. 1.67: Ventana del programa The Sky

La figura 1.68 reseña algunas de las opciones disponibles en el software de telescopios automatizados de la compañía ASCOM:

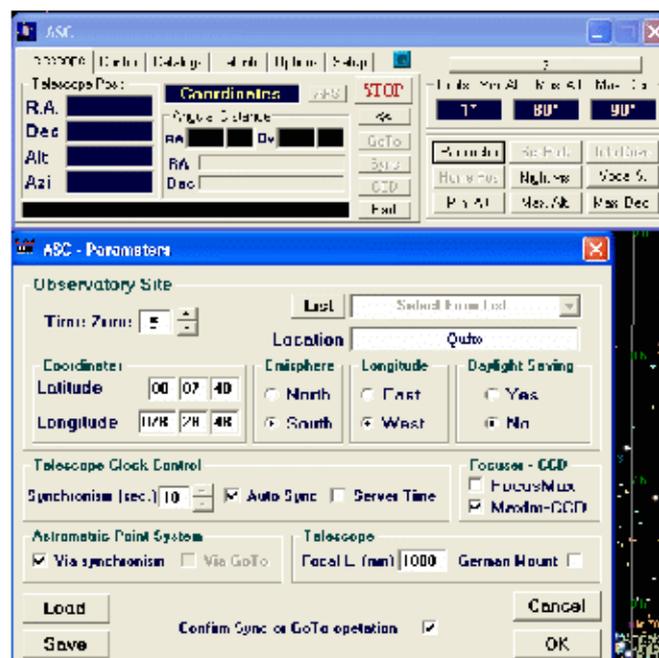


Fig. 1.68: Ventana de configuraciones del programa Advanced Scope Controls

En la figura 1.69 es posible observar opciones de configuración, entre las más importantes el seteo de zona horaria, locación, coordenadas geográficas, hemisferio, longitud



Fig. 1.69: Ventana de control del telescopio Meade LX200

En la ventana de control del telescopio LX200 de la figura 1.69 también se aprecian seteo de latitud, longitud, diferencia horaria de Greenwich, posición de objeto, posición de telescopio, entre otros. La ventana de la figura 1.70 es la más precisa para explicar y setear los parámetros de domo y telescopio, en la que constan valores de latitud, longitud, radio de domo, distancia del centro de domo a los ejes, altura de la montura y distancia del eje de montura al eje óptico.

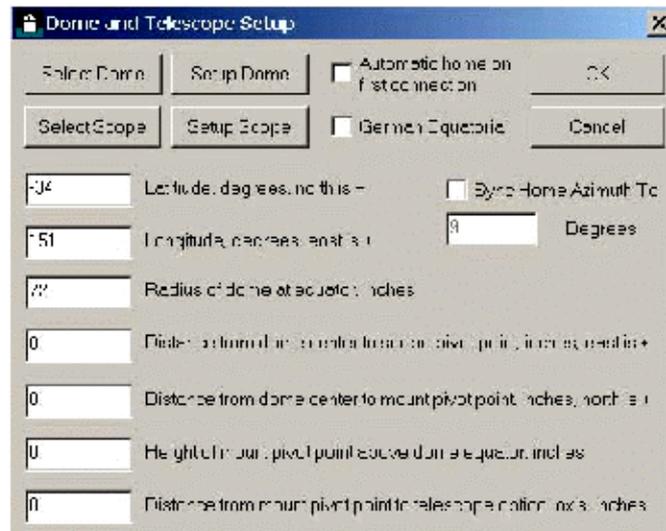


Fig. 1.70: Ventana de configuración de telescopio y domo de los sistemas ATS (Advanced Telescope Supplies)

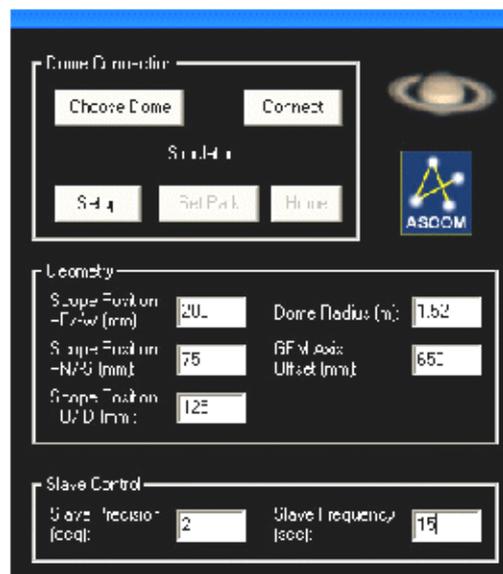


Fig. 1.71: Ventana de configuraciones y geometría de domo de los sistemas ASCOM

La figura 1.71 muestra el ingreso de valores de geometría de domo (posición respecto al eje E/W, N/S y Up/Down, radio de domo y desplazamiento de la montura), también de control esclavo del mismo.

Cabe incluir la información que proviene de los sensores atmosféricos adjuntos al observatorio y que son de gran ayuda para prevenir al mismo del mal tiempo (temperatura

ambiental, humedad relativa, condiciones de nubosidad, viento). En la figura 1.72 se muestra la ventana principal del programa de monitoreo de clima “Clarity”.

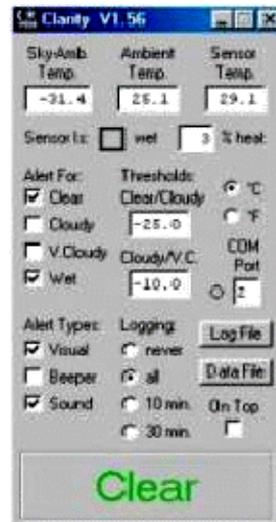


Fig. 1.72: Ventana del programa adjunto a los sensores atmosféricos “Clarity”

La figura 1.72 es una ventana de programa para monitorear variables atmosféricas, desplegando en tiempo real valores de temperatura ambiente, humedad relativa, alertas de nubosidad y en la parte inferior el diagnóstico del cielo (“Clear”, lo cual significa cielo claro).

Configurados los valores en las pantallas de control del software adjunto a un telescopio de este tipo se puede entonces maniobrarlo al gusto del observador.

1.15. ENLACES DE COMUNICACIÓN MÁS FRECUENTES ENTRE PC Y OBSERVATORIO

El sistema de comunicación es el conductor físico y los dispositivos conectados que hacen posible la transmisión de datos y comandos a través de uno ó más enlaces entre el usuario y el observatorio. Dependiendo en la cantidad de dispositivos a conectar y de la factibilidad de ejercer un control sea local ó remoto en el observatorio, se despliegan dos alternativas de comunicación y control:

- **Enlace directo:** Conecta conductores dedicados a cada dispositivo dentro del observatorio, enlaces que los recepta y maneja el PC de usuario, situado a corta distancia; es ventajoso por el hecho de requerir una sola PC y un solo sistema de comunicaciones, se aplica además si los dispositivos dentro del observatorio son ya relativamente automátatas. Aún así, este tipo demanda un cableado complicado. Enlace directo permite acceso sólo para el usuario del observatorio. En las figuras 1.73 y 1.74 existen ejemplos de enlaces directos.

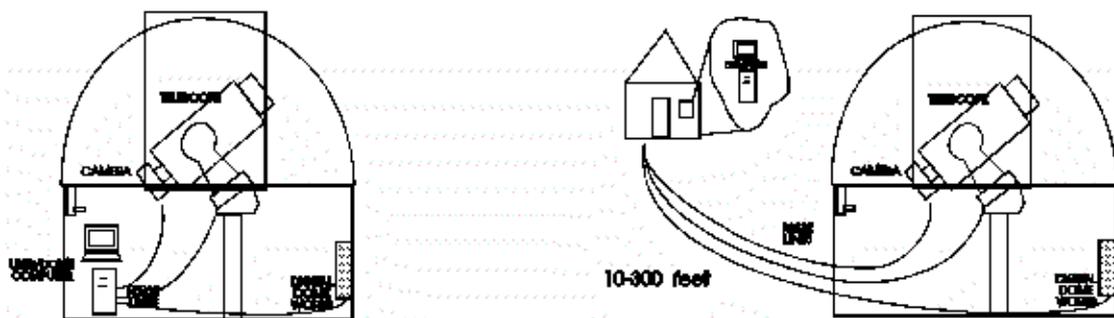


Fig. 1.73: Ejemplos de enlace directo en un observatorio

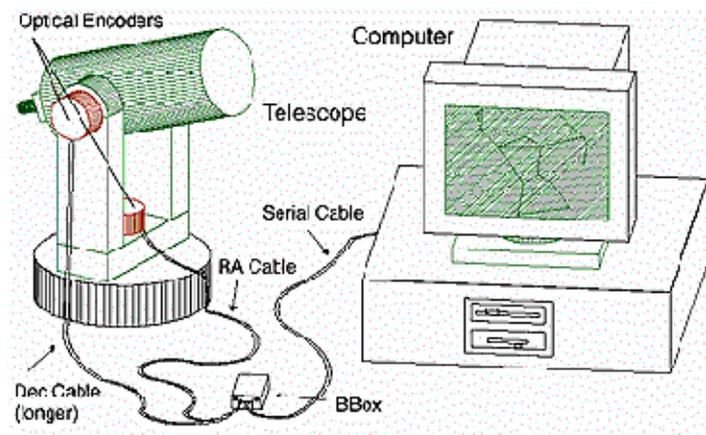


Fig. 1.74: Enlace directo de telescopio con una PC

Conforme aumenta la distancia entre el observatorio y la PC de usuario es ya necesario un tipo de comunicación y control que se adapte mejor, y se denomina multienlace.

- **Multienlace:** Diseñado preferentemente para distancias entre observatorio y PC de usuario mayores a 10 metros, aunque un observatorio puede tener configuración multienlace sin importar que la distancia sea corta. La verdadera diferencia respecto al enlace directo es el método de comunicación y control a ser utilizado lo cual implica hardware y software diferentes.

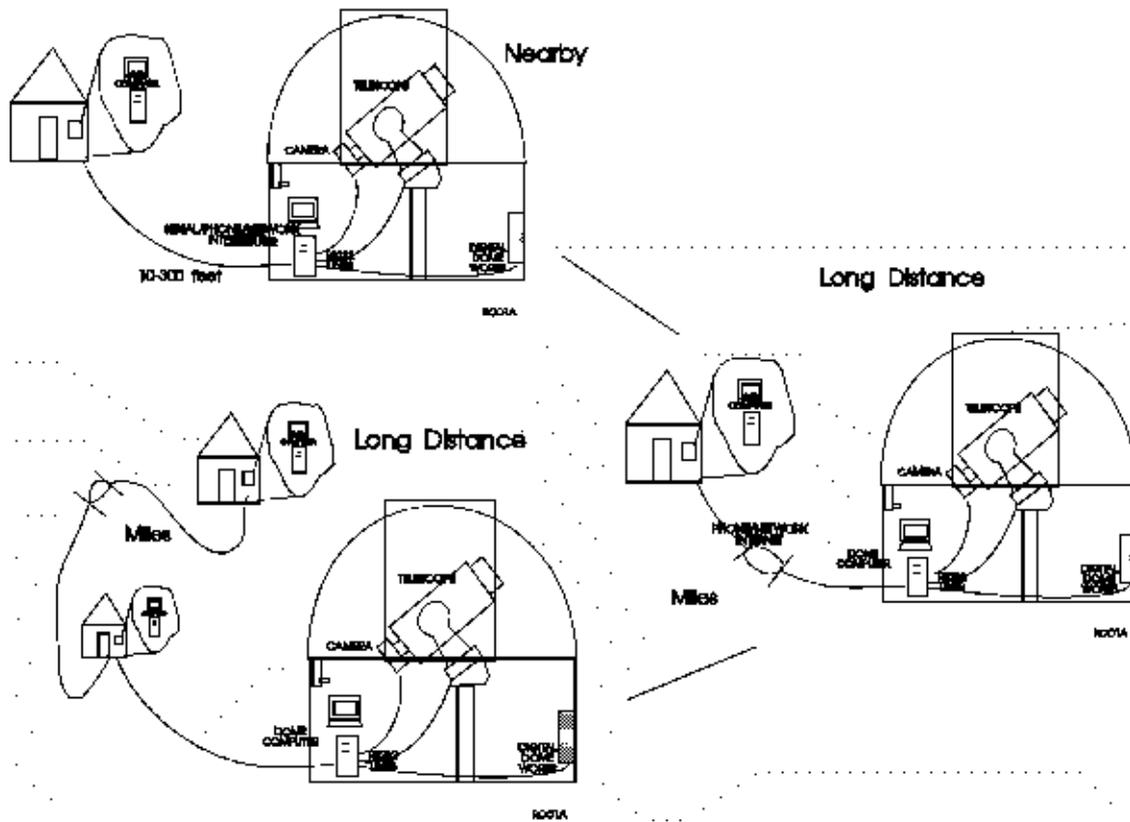


Fig. 1.75: Alternativas de multienlace en observatorios

En la figura 1.75, se muestra el mismo observatorio del enlace directo pero incluye una PC para domo. Esta instalación tiene dos enlaces sucesivos: Uno desde la PC de usuario a la PC de domo, y el otro de la PC de domo a cada instrumento. El primero utilizará muy probablemente una conexión vía LAN, Internet, USB, Wireless. La PC de domo se conecta a los dispositivos tal y como en enlace directo, con cables individuales hacia uno de los puertos de la PC.

Las configuraciones de comunicación requieren de un estándar de comunicaciones, mucho mejor si es el mismo que se utiliza frecuentemente en Instrumentación, ya que existen pocos fabricantes que se reservan el uso de sus propios estándares para la comunicación de sus dispositivos y la mayoría son explícitamente para instituciones grandes. Los telescopios para principiantes y los algo más avanzados se comercializan con estándares de comunicación ampliamente difundidos como son:

- ✓ Serial Port (RS – 232)
- ✓ Universal Serial Bus (USB)

Con propósitos de que puedan acceder múltiples usuarios a la red de un observatorio (multienlace) la PC de usuario el observatorio puede engancharse a la Internet ó a una red de área local para compartir este recurso, y para esto los estándares son:

- ✓ Ethernet (LAN)
- ✓ World Wide Web (Internet)
- ✓ Wireless (WLAN)

Los protocolos utilizados son los correspondientes a cada estándar, cabe diferenciar en algunos casos que no es lo mismo el protocolo de comunicación entre dispositivos y PC de usuario y el protocolo de comunicación hacia múltiples usuarios. Hay diversos protocolos multiusuario y no existe mayor problema con ello, el primer protocolo es el que varía de fabricante a fabricante.

1.16. COMANDOS MÁS COMUNES EN OPERACIÓN DE OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS

Existen gran cantidad de comandos cubriendo una amplia gama de tareas, desde las simples hasta las complejas dentro de la automatización de un observatorio. Los comandos propenden la ejecución de actividades, entre otras, relacionadas a:

- ❖ Inicialización, calibración
- ❖ Establecimiento de comunicación hacia la PC
- ❖ Control de movimiento
- ❖ Sensado de variables
- ❖ Seguridad, generación de mensajes de error y reportes
- ❖ Control de usuarios
- ❖ Base de datos
- ❖ Procesamiento de imagen

Todos los comandos deben estar disponibles en la PC del usuario, permitiendo crear una interface propia. Entonces, los dispositivos del observatorio se convierten en periféricos para la PC, con una integración de los mismos hacia el software que se maneje.

Un set de comandos dentro del software debe alcanzar el control total de un telescopio o domo, y que el mismo software proteja al observatorio determinando sus propios límites de operación. Se han dado numerosos set de comandos para control de observatorios, obedeciendo a múltiples protocolos, pero se han recopilado los más relevantes y comunes a casi todos aquellos protocolos:

- ***Comandos de inicialización***: Predisponen al hardware del observatorio a iniciar una sesión de observación, encendiendo los dispositivos y por lo general tomando lectura del estado de los sensores para realizar una puesta a cero de los mismos (calibración).
- ***Comandos de comunicación***: Habilitan la comunicación entre el hardware del observatorio y la PC, así el usuario visualizará el estado del observatorio desde la PC.
- ***Comandos de movimiento y control***: Una vez calibrados los dispositivos y establecida la comunicación, el observatorio esta listo para recibir órdenes del usuario según lo requiera, principalmente para accionar los motores y mover tanto telescopio como domo a las coordenadas establecidas, abrir y cerrar compuertas, cambiar la velocidad de movimiento, parámetros de control, adquisición de datos, alertas, etc.

- **Comandos misceláneos:** Ofrecen funciones extra al observatorio, como manejo de imagen, entorno de red, base de datos, generación de reportes, auto – encendido y auto – apagado, etc.

1.17. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD DE RASTREO

La observación de astros en un observatorio astronómico requiere que el hardware opere según lo que el telescopio precise para mantener su mira apuntada debidamente, este proceso en particular es relativamente lento pero de elevada precisión; hay además comandos que forzan a aquellos mismos dispositivos a movimientos más acelerados, se tiene entonces que el controlador del sistema tenga un amplio rango de control para los requerimientos extremos de la operación de un telescopio.

El movimiento lento es utilizado para que el astro a ser observado no se salga de la mira debido a la rotación de la Tierra, el astro de hecho tiene una velocidad aparente y constante de 4° de arco/minuto (15 segundos de arco/segundo) que a simple vista es casi imperceptible y provoca que domo y telescopio tengan que moverse a esa velocidad y con una precisión del 1%, el eje que debe ajustarse a ese ritmo es el de ascensión recta en la montura; en la terminología astronómica se lo conoce como “sidereal tracking rate” o velocidad de rastreo sideral, depende de los sensores de posición del sistema y de la configuración de control para que cumpla con tan elevada precisión. El movimiento conocido como “slewing” tiene la misión de servir al apuntamiento rápido del telescopio hacia el astro a observar en respuesta a un comando de azimut desde la posición de inicio, y es significativamente más rápido (velocidades típicas entre 1° /segundo a 8° /segundo) que la velocidad de rastreo sideral. Este movimiento demanda una menor precisión en vista de que se está desplazando (en el caso de domo y telescopio) una gran masa a un ritmo acelerado y aquello es complicado de controlar en cualquier proceso además de elevar el consumo de energía, sin embargo es una operación breve y que agiliza considerablemente la sesión de observación.

El diagrama de control de un servomecanismo del telescopio, mostrado en la figura 1.76 ayuda a identificar la característica dinámica del sistema en pos de obtener ese amplio rango de velocidades:

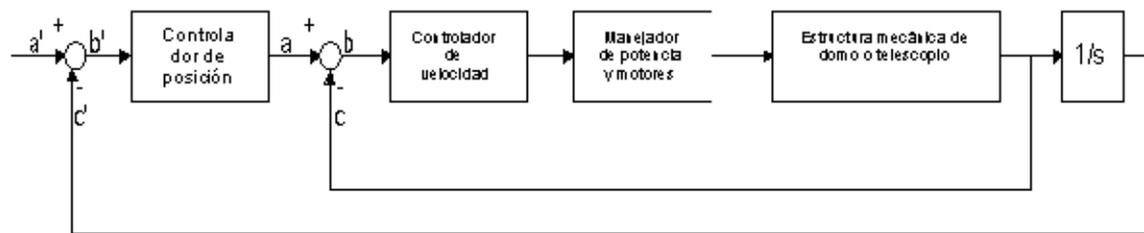


Fig. 1.76: Diagrama de control de servomecanismo en control de posición de telescopio

El diagrama posee un controlador de posición (izquierda) el cual capta una posición (setpoint) al que debe dirigir el domo o al telescopio, la convierte a una consigna que la toma el controlador de velocidad, sólo luego de este bloque es posible enviar una señal de control a los manejadores de potencia y de allí a accionar los motores; por medio de acople mecánico los motores mueven la estructura mecánica de telescopio ó de domo, el sistema posee realimentaciones de posición (c') y de velocidad (c) para cerrar el lazo.

1.18. SISTEMA DE ROTACIÓN DE DOMO

El rango de velocidades a los que debe operar un observatorio se fundamenta en el tipo de control y en la selección de motores y mecanismos adecuados, lo que garantiza una alta precisión, seguridad y ergonomía. En el caso puntual del domo, cuya función principal es permitir la visibilidad del telescopio hacia el cielo y a la vez protegerlo de agentes externos, necesita un conjunto motor – reductor idóneo para las velocidades que el telescopio demande; el domo debe primeramente estar en perfecta nivelación respecto al suelo, seguido de una libertad de movimiento en ambas direcciones con ligera o casi nula fricción, es ahí donde se analiza la estructura en cuanto a peso, momento de inercia, torque necesario para arrancar el movimiento, torque para mantener el domo girando a determinada velocidad, torque de frenado, entre otros.

El método de asentamiento y rotación del domo en un observatorio astronómico casi siempre es a base de un riel con trayectoria circular fijado al suelo y un conjunto de ruedas en el domo acopladas a dicho riel. Para no tener que acoplar directamente el eje de un motor eléctrico a una de las ruedas, no importa lo potente que sea y lo liviano del peso del domo, es imprescindible agregar un reductor mecánico entre eje del motor y el de la rueda

que sirva como motriz. Lo importante de esto es que “reduce” la carga al motor, implica un mejor desempeño y durabilidad del sistema, dependiendo del torque aplicado a las ruedas se escogerá cuantas se necesitan, su diámetro, sección transversal y la potencia de motor; en cada observatorio variarán los requisitos y la forma de esta razón ó reducción mecánica. En las figuras 1.77, 1.78 y 1.79 se muestran varios sistemas de movimiento para domo.



Fig. 1.77: Motor DC con engrane acoplado a su eje, el giro del domo es posible gracias a una hilera de dientes que se acoplan al engrane del motor

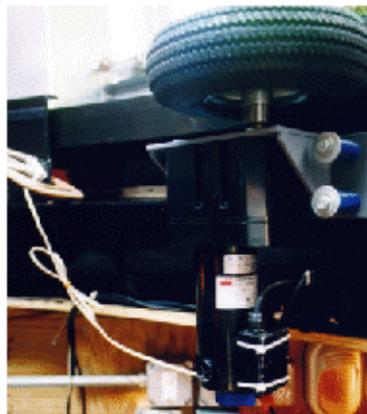


Fig. 1.78: Sistema de motor AC acoplado con engranes cónicos a una rueda de caucho que hace girar el domo



Fig. 1.79: Mecanismo similar al de la figura 1.78 pero con una rueda de menor tamaño y domo de madera

La reducción mecánica se lleva a cabo la mayoría de veces mediante un tren de engranajes, que varían la relación de velocidad al rango de revoluciones de un motor, acoplándolo a la carga mecánica y buscando la mayor eficiencia, ya sea engranaje recto, cónico o helicoidal. Para el caso del Observatorio de la Alameda, el sistema de engranajes es recto, existen 4 engranes desde la rueda motriz hasta la manivela, y permite la rotación del domo impulsando la manivela con la fuerza de una persona. La rueda motriz se asienta sobre un riel circular, junto a 11 ruedas más que sirven para repartir el peso de la estructura y que pueda girar libremente

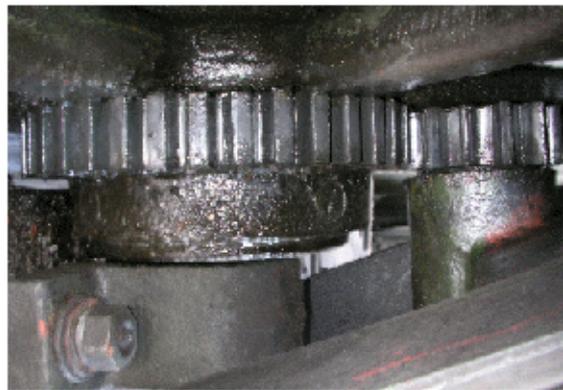


Fig. 1.80: Detalle de los dos primeros engranes del sistema reductor de domo del Observatorio

1.18.1. Cálculo de relación mecánica

La rueda motriz está directamente acoplada al eje de del primer engrane (izquierda), que posee 40 dientes, el segundo engrane se acopla y está en línea al primero, posee 13 dientes. La relación mecánica en este par de engranes rectos y alineados es:

$$\begin{aligned}
 \text{Relación} &= \frac{\# \text{dientes segundo engrane}}{\# \text{dientes primer engrane}} \\
 \text{Relación} &= \frac{13}{40} = 0.325
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

El segundo engrane recto está conectado al tercer engrane (86 dientes) mediante un eje desplazado 30 cm. e integra otra relación mecánica con el cuarto engrane (16 dientes), el que finalmente se acopla a la manivela. En este caso la relación mecánica es:

$$\begin{aligned} \text{Relacion}2 &= \frac{\# \text{dientes cuarto engrane}}{\# \text{dientes tercer engrane}} \\ \text{Relacion}2 &= \frac{16}{86} = 0.186 \end{aligned} \quad (1.17)$$

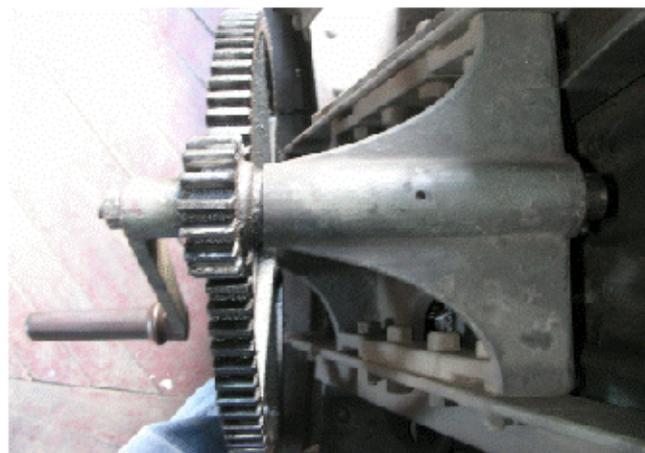
La relación total de reducción mecánica de los engranajes es el producto de las relaciones mecánicas individuales:

$$\begin{aligned} \text{Relacion total} &= \text{Relacion}1 \times \text{relacion}2 \\ \text{Relacion total} &= \frac{13}{40} \times \frac{16}{86} = \frac{13}{215} \cong 0.0604 \end{aligned} \quad (1.18)$$

La velocidad de un motor se reduciría mediante este sistema si el mismo fuese acoplado al último engranaje en una proporción de 16.5 a 1 aproximadamente; en observatorios son usuales relaciones de reducción entre 20:1 a 60:1



(a)



(b)

Fig. 1.81: (a) Vista frontal del tercer y cuarto engranes; (b) Vista superior de los mismos engranes del sistema reductor del Observatorio

1.18.2. Motores eléctricos utilizados en conjunto a reductores mecánicos

Con respecto a motores, es preciso decidir, y dependiendo de la estructura, que tipo utilizar. Por ejemplo, los motores a pasos son accesibles y muy confiables, sin embargo no tienen una gama amplia de velocidades que si las tiene un servomotor DC ó AC. El torque de los motores a pasos decrece al incrementar su velocidad, los servomotores se ha comprobado que pueden ejercer velocidades en los dispositivos de un observatorio hasta diez veces más rápido que con motor a pasos. Cabe señalar que de todas maneras ambos tipos de motores tienen su utilidad, para el movimiento del telescopio se requiere de elevada precisión, lo cual encaja en la capacidad de un motor a pasos; en cambio para una estructura más pesada como el domo pide mayor potencia y una menor precisión, es justo donde se aplican las prestaciones de un servomotor.

1.19. CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADECUADAS

El software de control capta señal de los sensores atmosféricos, mide y determina si existen o no condiciones meteorológicas adecuadas para iniciar una sesión de observación, así como puede cancelar la sesión si se da un cambio abrupto de las mismas. Como en cualquier proceso, es valiosa la adquisición de datos de estos sensores en tiempo real ya que el sistema de automatización del observatorio trabaja en forma continua, para el caso de ciertos observatorios el período de actualización de datos atmosféricos es de 10 segundos. Las variables principales que se monitorean son la temperatura ambiental, presión atmosférica, humedad relativa, precipitaciones, velocidad y dirección de viento como las más relevantes. La gráfica 1.82 muestra las ventanas de un programa que trabaja en conjunto al software de control del observatorio y muestran en secuencia la “predicción” del cielo en cuanto a su nubosidad, desde “Clear” para cielo despejado hasta “Rain” para lluvia inminente:

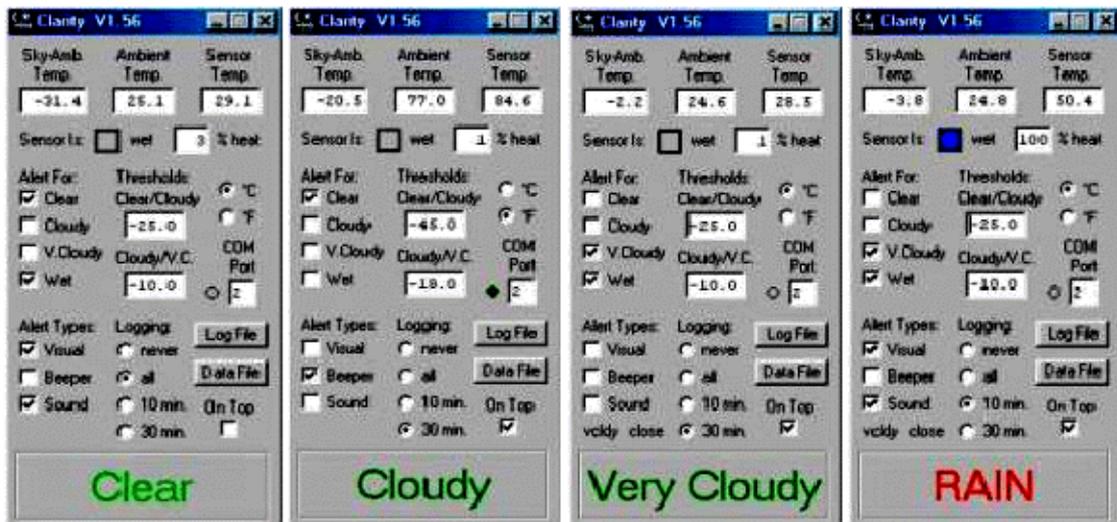


Fig. 1.82: Ventanas de diferentes pronósticos en el programa de monitoreo de clima

El programa toma la señal de los sensores de clima y los utiliza para calcular la condición de nubosidad del sitio. En síntesis, si el programa recibe una lectura baja de temperatura del aire y una baja de la presión atmosférica son síntomas de una eminente lluvia. En cambio, como la detección de nubosidad trabaja basada en sensores infrarrojos, mostrados en las figuras 1.83 y 1.84, si la señal de este dispositivo es baja y la temperatura del aire también lo es, tenemos un cielo despejado. Para todas las variables el programa establece sus límites, los cuales si se exceden toma una acción de control que la envía al controlador y que este a su vez active los dispositivos que precautelen al sistema del mal clima.

Los observatorios poseen todo este instrumental exclusivamente para sus sesiones de observación. La forma usual de recopilar estos parámetros atmosféricos sobre todo para predicción de clima es con una estación meteorológica junto a un datalogger. Este es el caso del Observatorio de la Alameda, que dispone de una pequeña estación meteorológica y bien podría suplir la necesidad de predicción de clima para el funcionamiento del Observatorio.

Los elementos sensores acoplados a un observatorio mostrado en la figura 1.85, si bien trabajan conforme a las expectativas, no son infalibles y requieren de un mantenimiento periódico debido a que deben soportar la inclemencia del clima, polvo, humedad, radiación solar, etc. La opción de tener una estación meteorológica es favorable, otra sería obtener la

predicción de clima por parte de instituciones especializadas como el INAMHI en nuestro país.



Fig. 1.83: Sensor de temperatura instalado en los exteriores de un observatorio

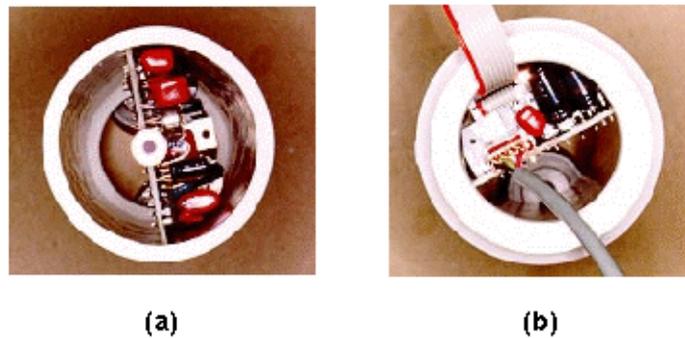


Fig. 1.84: (a) Vista superior del sensor de temperatura y circuitería adjunta; (b) Parte inferior del tubo donde se encuentra el sensor



Fig. 1.85: Detalle de la parte superior del sensor, mostrando el arreglo de termopilas que sirve para la medición de temperatura de las nubes

1.20. PROCESO DE OBSERVACIÓN DE UN ASTRO

En los telescopios convencionales, el movimiento de posicionamiento y guiado es controlado en dos grados de libertad. Esto significa que el telescopio puede obtener

imágenes de casi cualquier punto del cielo en el firmamento posicionando el telescopio con dos movimientos angulares. Para el guiado del telescopio se necesita además compensar el movimiento de rotación de nuestro planeta. Esto implica ajustar continuamente la posición del telescopio para mantener fijo el punto de observación deseado, este es uno de los principales objetivos a cumplir por parte de la automatización aplicada a este campo. Según la necesidad del observador, le indicará como el sistema va a actuar por medio de un “observation request” o requerimiento de observación, no es más que la ejecución de un comando ó varios de ellos. Para una sesión de observación especializada, es usual que el requerimiento inicial sea localizando al astro a observar, sea tan solo por su nombre o por sus coordenadas, luego especificando el ó los equipos a utilizar, y el tiempo que efectivamente se observe el astro (tiempo de exposición). Es muy importante obtener datos de los sensores atmosféricos en el instante que se pretende iniciar la observación, dado que el controlador no permite empezar con la misma si las condiciones de clima no son favorables. En una sesión de observación típica, a más de los pasos antes descritos es necesario establecer comunicación entre la pc de usuario y el observatorio, arrancar el software de control y monitoreo, finalmente ejecutar los comandos de operación. Durante la sesión estos comandos son ejecutados secuencialmente y con distintas bases de tiempo, incluso hay sistemas que almacenan (log file) los comandos enviados al controlador, datos de fecha, hora, movimientos, códigos de error y respuesta del controlador para posteriores sesiones. En la figura 1.86 se encuentra el proceso de observación de un astro de forma general.

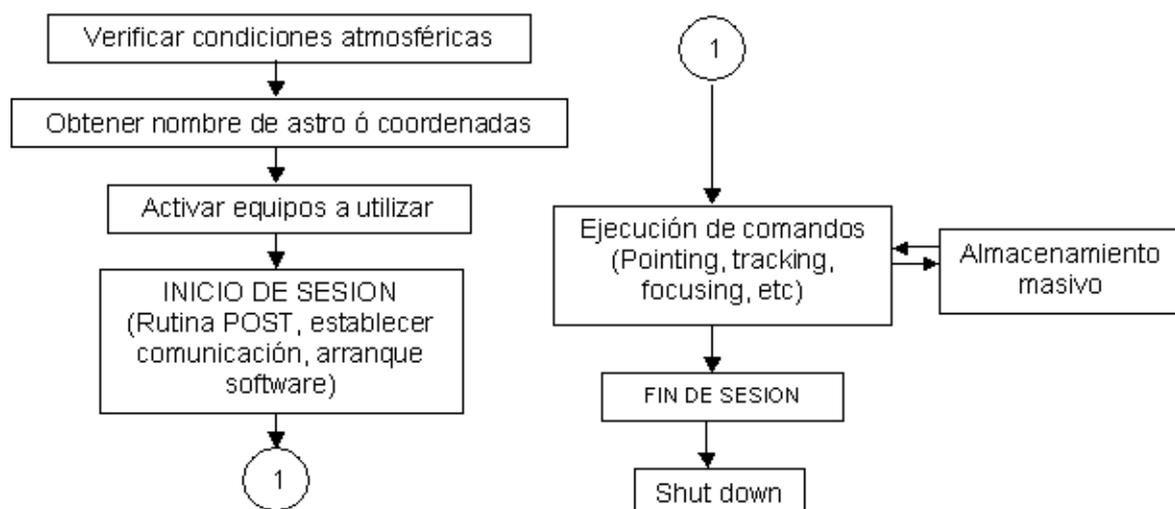


Fig. 1.86: Diagrama del proceso de observación de un astro

El sistema de control de un observatorio es diseñado para que su uso sea muy similar al inicio de sesión de un computador personal, lo que implica emular ciertas características como el inicio de sesión, autocalibración, recuperación de sistema en caso de errores graves, duración de sesión, “shut down” automático, etc. Precisamente al finalizar la sesión el sistema establece una secuencia para desactivar cada componente de hardware y software con tal de dejarlos en su estado de reposo, dispuestos para la siguiente sesión, así como verificar la activación de los dispositivos de seguridad en caso de fin de sesión no previsto, fallo de energía u otra circunstancia.

1.20.1. Estandarizaciones y problemas frecuentes

Con el proceso de automatización de seguimiento de astros en un observatorio aparecen los parámetros a los que debe regirse el sistema de control, en variables diversas como:

- Desplazamiento angular (Azimut, altitud en montura alt – azimutal, o Ascensión recta y Declinación en montura ecuatorial)
- Posiciones iniciales
- Velocidades de posicionamiento y rastreo

El domo ó cúpula reside su utilidad en la posición angular que pueda tomar su apertura central para que sirva a la lente del telescopio en el apuntamiento y observación de astros en el cielo. Una disposición del domo en forma circular conlleva a que su desplazamiento angular (en grados) sea acorde a las coordenadas buscadas para observar cierto astro. El método más corriente de localizar una estrella, o un punto en la superficie de la Tierra, es utilizar su distancia angular en grados, minutos y segundos a ciertos puntos o líneas de referencia fijadas. Para estandarizar este desplazamiento angular en el domo, se fija una posición de 0° en cierto ángulo o en alguno de los cuatro puntos cardinales (frecuentemente al Norte ó al Sur) y desde allí se inicia el conteo en grados positivos sea en el sentido de las manecillas del reloj ó en contra según la conveniencia. Las figuras 1.87 y 1.88 muestran ejemplos de esta estandarización.

Como la declinación del telescopio es un equivalente del azimut del domo, y la declinación está determinada en grados, minutos y segundos, el ángulo a donde se quiera enviar la apertura del domo tendrá la misma nomenclatura.

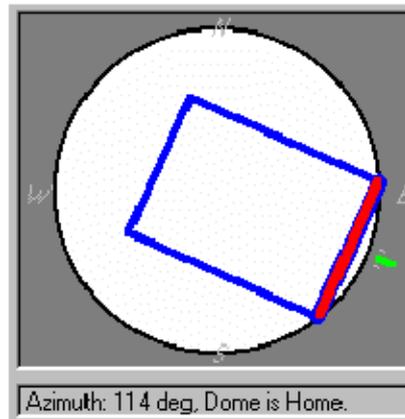


Fig. 1.87: Representación gráfica del domo, apertura central y su posición inicial marcada con un guión (114°)

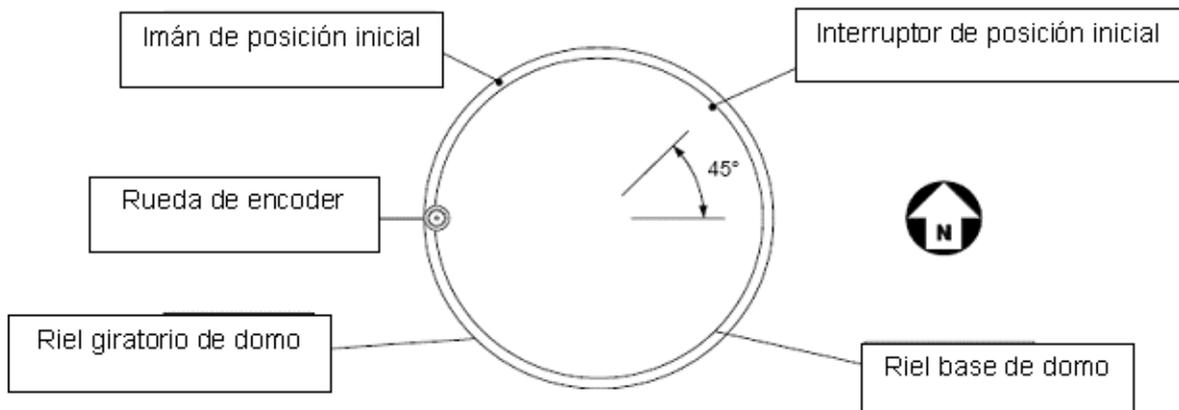


Fig. 1.88: Interruptor magnético de posición de inicio en la posición nor – este (45°)

La figura 1.88 también muestra el imán de posición de inicio, la rueda de encoder y el riel base de domo. Además de errores en la posición angular, son usuales los problemas suscitados en los seguros, sensores atmosféricos y control manual del observatorio. Hay en particular el caso de que los observatorios sean operados en forma remota, lo cual aumenta la complejidad y por ende los eventuales problemas, como la pérdida del enlace de comunicación, falla en los dispositivos de respaldo energético (UPS), entre otros. Cabe recordar los inconvenientes intrínsecos del sitio de observación y que en ciertos casos se

pueden atenuar y en otros no del todo (polución lumínica, relieve del terreno, interferencias de todo tipo).

Finalmente se agrega los altercados que es probable se tengan con la PC de usuario y el software de control, sistema propenso a colgarse y dejar al observatorio sin control automático; para esto es imprescindible que el control del sistema lo realice un “computador dedicado” como lo son microcontroladores, PLC, y otros para que actúen de forma confiable ante una falla en el software de supervisión y control en la PC de usuario.

1.20.2. Hardware y software que demanda un proceso de observación 100% automatizado

La automatización forma parte de la Astronomía moderna, y han sido los más significativos adelantos tecnológicos que impulsan esta actividad; al tener los dispositivos dedicados a la Astronomía componentes mecánicos, ópticos y eléctricos se han sumado componentes de supervisión, control, procesamiento digital de imagen, operación local ó remota, entorno multiusuario y más. Para entrar en detalle de las diferentes categorías de hardware y software asociado véase la tabla 1.2:

Tabla 1.2: Elementos de hardware y software incorporados a un sistema de observatorio automatizado

<i>Hardware</i>	<i>Software</i>
Elementos mecánicos	Control de movimiento en telescopio
Electrónica de control y sensado	Control de movimiento en domo
Electrónica de potencia	Sistema de seguridades
Interface de comunicación	Catálogo de cuerpos celestes
Procesamiento digital de imagen	Captura de imagen
Otros	Acceso virtual

- ***Elementos mecánicos:*** Este parámetro comprende en buena parte el medio físico en si del observatorio, que mueve y protege el sistema óptico, incluye la estructura de domo, su sistema motriz (acoples mecánicos), compuertas, rieles, poleas, la montura y ejes del telescopio. Se muestran en las figuras 1.89, 1.90.



(a)



(b)

Fig. 1.89: (a) Armazón metálico del domo de un mini observatorio; (b) Base de montura y montura ecuatorial de un telescopio dentro del observatorio



Fig. 1.90: Sistema mecánico de apertura y cierre de compuertas

- *Electrónica de control y sensado*: Manejan actualmente los comandos u operaciones que se realizan en un observatorio moderno, al instaurar un verdadero control de proceso por parte de un dispositivo microcontrolador, auxiliado por otro dispositivo electrónico de supervisión que puede ser una PC; el sensado de variables atmosféricas se hace simple con los distintos sensores acoplados al circuito de control. Se muestran en las figuras 1.91, 1.92 y 1.93.



Fig. 1.91: Display y botones de comando en el panel de un microcontrolador para domo

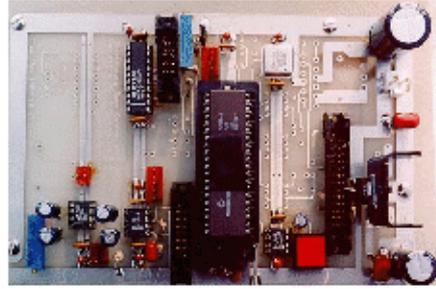


Fig. 1.92: Placa de circuito de microcontrolador de domo

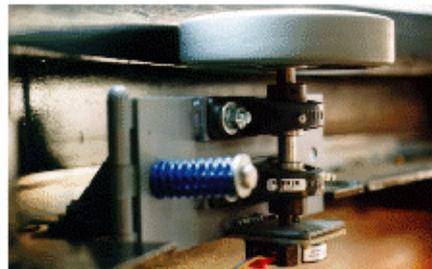


Fig. 1.93: Rueda acoplada a parte móvil del domo y que a su vez permite al encoder determinar la posición

- *Electrónica de potencia*: Una operación rápida y precisa de los elementos mecánicos y ópticos del observatorio puede llevarse a cabo mediante dispositivos electrónicos de manejo de potencia para impulsar motores eléctricos, comandados obviamente por la etapa de control y sensado. Esta implementación es la que hace la “fuerza” de operación para un observatorio y la que evita tener que mover la parte mecánica manualmente. Las figuras 1.94 y 1.95 muestran elementos de potencia que impulsan a la estructura de domo.



Fig. 1.94: Motor AC de inducción impulsa el giro del domo, manejado por un circuito conversor de potencia



Fig. 1.95: “Caja de contactos” en un domo, suministran de alimentación a los dispositivos de la parte móvil del domo

- **Interface de comunicación:** Ahora es posible tener un observatorio con control de usuario en forma local ó remota, ya que los enlaces de comunicación electrónica extienden en distancia las posibilidades de control. Intervienen varios estándares conocidos de comunicación, como serial, USB, Wireless, Ethernet, Internet. En la figura 1.96 se muestra un dispositivo de comunicación inalámbrica.



Fig. 1.96: Transmisor – receptor inalámbrico

- **Procesamiento digital de imagen:** Los sensores de imagen acoplados en un telescopio moderno capturan la visión del astro al que se desea apuntar y la convierte en un archivo digital de imagen, son como cámaras fotográficas digitales dedicadas a la Astronomía.
- **Otros:** Son prestaciones que la mayoría de los casos sirven de respaldo y protección al observatorio en caso de errores (fuentes UPS, seguros, dispositivos de supervisión, etc).

En software casi todos los elementos se pueden condensar en un paquete encargado de administrar los recursos de hardware que operen en el observatorio, como en una ventana de programa mostrada en la figura 1.97:



Fig. 1.97: Ventana del software de sistema de control de domo “Observa – dome”, mostrando configuración de comunicaciones, control de azimut y control de compuertas.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE ELECTRONICA Y CONTROL APLICADOS AL PROYECTO

2.1. PROCESO DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO

El diseño de sistemas de control se convierte en un proceso, ya que basa su efectividad en la secuencia ordenada de pasos y la realimentación del mismo cuando no se satisfacen los requerimientos (si al seguir los pasos para el diseño y, llegando al paso final no se cumplen los objetivos para el cual fue hecho, el sistema vuelve a diseñarse y probarse). Con este criterio de diseño el sistema queda listo para responder apropiadamente a las demandas de quien lo utilice y del proceso que manejará. De forma resumida se explican los pasos de esta secuencia para el diseño:

2.1.1. Pasos de diseño¹

- *Adaptación del sistema real en un sistema físico:* En este paso es necesaria la interpretación más coherente posible de las características físicas y de comportamiento del sistema sujeto de diseño a fin de que se amolden con parámetros establecidos dentro de la Física, Dinámica, Mecánica. El sistema se diseñará entonces a partir del uso de estos requerimientos y sus respectivas consideraciones.
- *Representación de elementos en diagrama de bloques funcional:* La representación en diagrama de bloques funcional es muy similar a la representación típica de un sistema de control en diagrama de bloques, traduce el sistema real a bloques descriptivos del mismo. Los parámetros de este diagrama proceden como en el paso anterior salvo que

¹ Nise, Norman: Sistemas de control para ingeniería

aplica sólo al funcionamiento en si del proceso, mas no a leyes y consideraciones previas.

- *Representación en diagrama esquemático*: Un diagrama esquemático es el paso previo al verdadero diagrama de bloques considerado en sistemas de control, toma la descripción de funciones y sus interconexiones realizadas en el paso anterior que, si bien pudo resultar un sistema simple, es transformado y puesto a prueba por el diseñador. Aquí es vital analizar el comportamiento de cada componente con el propósito de agregar ese patrón de comportamiento al sistema y hacerlo más complejo. Las suposiciones respecto a aquellos componentes que se asuma no afecten significativamente al sistema deben cuidadosamente tomarse, depende en el conocimiento de postulados físicos y en la experiencia práctica.
- *Modelado matemático*: Luego de aislar los componentes útiles del sistema y representarlos simbólicamente en un esquema, junto a la aplicación de leyes físicas y asumiendo ciertas condiciones es viable el desarrollo del modelo matemático. El objetivo de este paso es encontrar una relación matemática entre la entrada y la salida del sistema, con todas las variables agregadas y comprobadas a través de los análisis de rigor. Dicha relación matemática se la conoce como función de transferencia, la cual muestra en una igualdad simple el comportamiento de la totalidad del sistema. Adicionalmente es imperante mencionar e incluir en la obtención de la función de transferencia a las constantes intrínsecas del sistema como coeficiente de rozamiento, constante dieléctrica, momento de inercia para dar algunos ejemplos. Existen varios caminos para representar esta función de transferencia, sea con ecuaciones diferenciales (ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo), deducir mediante la transformada de Laplace (dominio S) o por espacio de estados. Para derivar la función de transferencia es necesario transformar las ecuaciones de salida y las variables en términos del dominio en que se desee resolver.
- *Reducción de diagrama de bloques*: La obtención de la función de transferencia en el punto previo describe el comportamiento del sistema, sin embargo en muchos casos resulta extensa para propósitos de análisis y diseño por la cantidad de términos. Cada término implica un bloque en el diagrama, así que es de gran ayuda simplificar aquellos bloques en uno solo que sea equivalente a lo que representa la función de transferencia original y con el mismo efecto entre salida y entrada (forma canónica).

Para la simplificación de diagramas de bloque existen reglas por lo que cualquier sistema es sujeto de reducción.

- *Análisis y evaluación en el diseño*: Luego de obtener un diagrama de bloques reducido a una expresión que represente a la función de transferencia es turno del análisis y diseño final. Se aplica una señal de prueba en la entrada del sistema y su respuesta a la salida es evaluada, según criterios de desempeño si los cumple se decide dejar intacto el sistema, de no lograrlo hay que reconfigurar o rediseñar el ó los parámetros necesarios, volver a someter a análisis y así hasta alcanzar el desempeño deseado. Precisamente para que el sistema permanezca incorrupto ante cualquier perturbación se desarrollan estas pruebas y se rige a un desempeño aceptable. A la par de este criterio, debe observarse su correcto funcionamiento en todo el rango de operación sin degradarse.

2.2. REPRESENTACIÓN DE LA PLANTA²

La función de transferencia muestra la relación entrada – salida de un sistema, y en términos más concretos un sistema de control se compone de sus elementos básicos: la planta y el controlador. En la descripción de pasos del punto anterior se incluían ambas partes para deducir una expresión y que represente al sistema como un todo, sin embargo en esta instancia necesariamente hay que analizar por separado. Una representación del sistema de control con sus elementos básicos se muestra en la figura 2.1.

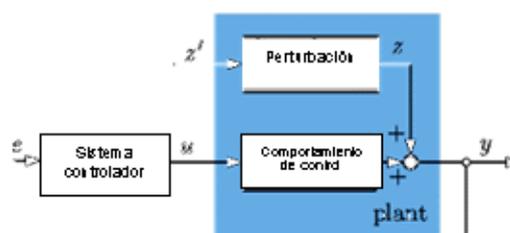


Fig. 2.1. Elementos básicos de un sistema de control no realimentado

² Rohrs, Charles: Sistemas de control lineal

La planta de un sistema constituye el centro de operaciones del mismo, el conjunto de elementos de una máquina que propenden al movimiento ó acción, en forma análoga como lo son los músculos y articulaciones en el ser humano. Rige al funcionamiento de la planta su modelo matemático, una descripción representada en ecuaciones ó términos matemáticos del comportamiento del sistema físico; es imprescindible realizar la identificación de la planta para posteriormente aplicar alguno de los tipos de control. Un típico sistema de control a lazo cerrado se muestra en la figura 2.1.

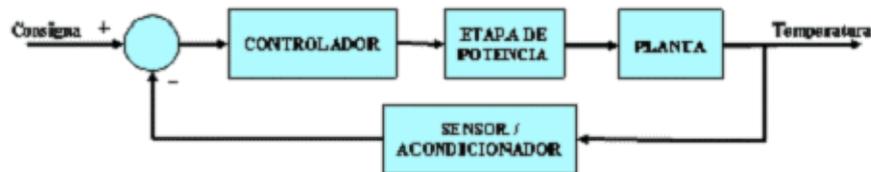


Fig. 2.2. Diagrama de bloques de un sistema a lazo cerrado de temperatura

Para este sistema se agregan dos componentes a los básicos de un sistema de control: el dispositivo de medición (sensor acondicionador) y el actuador (etapa de potencia). Es prudente y lo más práctico realizar la identificación de la planta según el orden y la variable de sistema. Se introduce una señal de prueba y luego se analiza su respuesta, a partir de la cual surgen los parámetros necesarios para la selección de controlador. Esto se lo conoce como identificación clásica ó directa de la planta.

Para el tipo de planta a controlarse la mayoría de casos basta con realizar una identificación clásica, a base de la aplicación de una señal de prueba escalón. La función escalón es la más aplicada en control automático, y la que mejores resultados arroja para el diseño.

Con la culminación del modelo matemático de la planta, a continuación se procede al diseño de un controlador análogo estándar (Proporcional, Integral, Derivativo) para que satisfaga las características del sistema controlado. Las herramientas de software han simplificado este procedimiento, al simular el comportamiento de los modelos matemáticos en conjunto a los tipos de control a ser analizados, ofreciendo con gran precisión y en una interfase amigable los resultados buscados.

2.3. COMPENSADORES Ó CONTROLADORES

Para tener la idea clara del desempeño de los sistemas de control, se necesita distinguir entre el sistema de control realimentado y el no realimentado³, la importancia radica en cerrar ó abrir el lazo de control y es precisamente en el caso de los sistemas realimentados de control donde tienen cabida los compensadores ó controladores.

Tanto el sistema realimentado como en de lazo abierto pretenden mantener una variable física (variable controlada) a un nivel deseado, sin embargo las limitaciones que implica un sistema a lazo abierto como es la no medición de la salida para compararla con la entrada del sistema, ó la vulnerabilidad a perturbaciones, y el sistema pasa a funcionar como un regulador mas que como un controlador; todo esto hace más viable la utilización del sistema realimentado ó de lazo cerrado para propósitos de control.

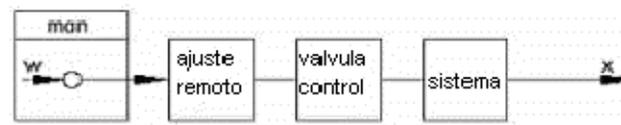


Fig. 2.3. Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo abierto

En los sistemas de control a lazo abierto es desde la entrada y de forma muchas veces manual como se mantiene una variable controlada, en cambio en los sistemas a lazo cerrado existe la realimentación desde la salida para que sirva de referencia a la entrada del sistema y así cumpla la acción de control.

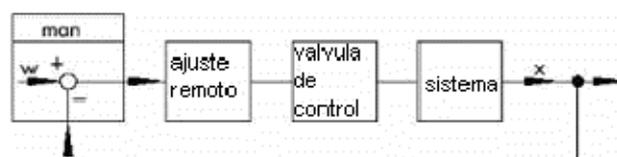


Fig. 2.4. Diagrama de bloques de un sistema realimentado de control

³ Kuo, Benjamín: Sistemas de control automático

2.4. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA⁴

Para un sistema lineal e invariante en el tiempo, la función de transferencia es la representación matemática de la relación entre su entrada y su salida, o la razón de cambio entre ambos extremos del sistema.



Fig. 2.5. Diagrama de bloques de un sistema mostrando su función de transferencia

La función de transferencia es comúnmente utilizada para analizar sistemas de control simples (una entrada, una salida), en procesamiento de señales, comunicaciones electrónicas, etc. El término se lo atribuye para referirse a los sistemas lineales e invariantes en el tiempo. En el caso del ejemplo citado en la figura 2.3., el sistema es lineal pero tal comportamiento no representa a la mayoría de sistemas reales de control, los cuales poseen características no lineales.

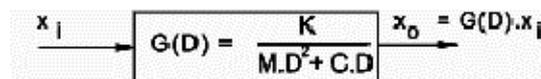


Fig. 2.6. Función de transferencia de un sistema no lineal

En su forma más simple, para una señal de entrada $x(t)$ y salida $y(t)$, la función de transferencia es el mapeo lineal de la Transformada de Laplace de la entrada que ahora es $X(s)$ sobre la salida $Y(s)$

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (2.1)$$

o

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.2)$$

⁴ Rohrs, Charles: Sistemas de control lineal

donde $H(s)$ es la función de transferencia del sistema lineal e invariante en el tiempo.

2.5. TIPOS DE CONTROLES

Para cada proceso existe un tipo de control idóneo, al analizar sus requerimientos y las características de comportamiento dinámico, en buena parte se debe este criterio a la respuesta del controlador. No en todos los casos bastará con una acción rápida de control, es en la compensación y cómo se aplique a cada proceso lo que determinará el escogimiento del tipo adecuado de control. Por la acción de control, los compensadores ó controladores se clasifican⁵:

- Controlador de acción proporcional
- Controlador de acción integral
- Controlador de acción derivativa

2.5.1. Función de transferencia de cada tipo de control

El control proporcional posee una función de transferencia considerada estática en relación al control integral y derivativo:

$$c_{(t)} = K_p * e_{(t)} + c_s \quad (2.2)$$

donde K_p es la constante de proporcionalidad ó ganancia del sistema, $e_{(t)}$ es la señal de error del controlador y c_s es la condición inicial del mismo. En la figura 2.7. se muestra una gráfica de la respuesta tipo de un controlador proporcional.

⁵ Bolton, William: Ingeniería de control

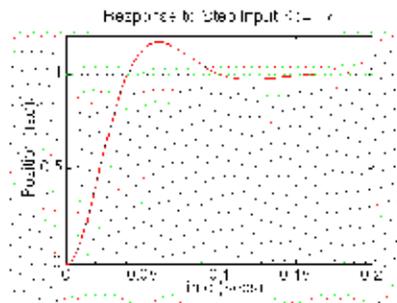


Fig. 2.7. Respuesta en el tiempo de un controlador proporcional a una entrada escalón

Para el control de acción integral se tiene una función de transferencia que responde de manera diferente al error, al comportarse como un acumulador (integrador) de señal de error:

$$c(t) = K_i \int e(t) \quad (2.3)$$

donde K_i es la constante de tiempo integral. En la figura 2.8. se muestra una gráfica de la respuesta tipo de un controlador proporcional más integral.

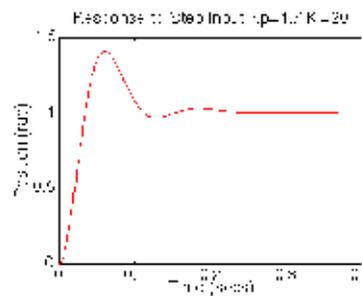


Fig. 2.8. Respuesta en el tiempo de un controlador PI a una entrada escalón

En el control derivativo acontece una respuesta en base a la rapidez de cambio de señal de error:

$$c(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

El control derivativo toma la derivada del error y la multiplica por la constante K_d . En la figura 2.9. se muestra una gráfica de la respuesta tipo de un controlador proporcional más derivativo.

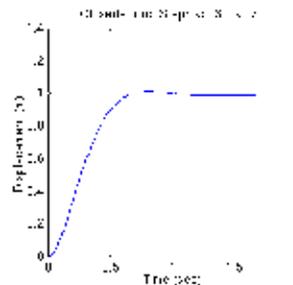


Fig. 2.9. Respuesta en el tiempo de un controlador PD a una entrada escalón

Expresados los controles en el dominio de la transformada de Laplace se obtiene:

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (2.5)$$

La curva de un controlador PID se expresa en la figura 2.10.

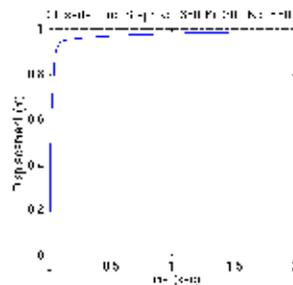


Fig. 2.9. Respuesta en el tiempo de un controlador PID a una entrada escalón

2.5.2. Características de los controladores

Un controlador proporcional (constante K_p) tendrá el efecto de reducir el tiempo de subida y reducirá pero nunca para eliminar al error en estado estable. El control integral (K_i)

elimina el error en estado estable, pero empeorará su respuesta transitoria. Un control derivativo (K_d) incrementará la estabilidad del sistema al anticiparse al error, reduciendo el sobreimpulso, mejorando la respuesta transitoria pero no puede lograrlo sin que actúe conjuntamente a los controles integral y proporcional. Los efectos de cada tipo de control en un sistema a lazo cerrado se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Comparativa de comportamiento en cada tipo de control

Tipo	Tiempo subida	Sobreimpulso	Tiempo establecimiento	Error estado estable
Kp	Reduce	Incrementa	Poco cambio	Reduce
Ki	Reduce	Incrementa	Incrementa	Elimina
Kd	Poco cambio	Reduce	Reduce	Poco cambio

Nótese que estas correlaciones pueden no ser precisas en todos los casos, porque los tres controladores dependen uno de otro. De hecho, variar una de estos parámetros afectará a los dos restantes.

2.6. LAZO DE CONTROL PROPORCIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVO (PID)⁶

Tres de las acciones de control se pueden combinar para obtener el controlador PID, el tipo de control más utilizado. Un sistema de control a lazo cerrado que brinda una respuesta rápida, buena estabilidad del sistema, un sobreimpulso mínimo y bajo error de régimen permanente. Un controlador PID tiene la siguiente forma general:

$$C_{(s)} = K_p \left(1 + K_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.6)$$

donde K_p es la ganancia proporcional, $K_p * K_d$ es la ganancia derivativa y K_p / T_i es la ganancia integral. Los términos Proporcional, Integral y Derivativo describen tres funciones matemáticas básicas aplicadas a la señal de error. El error representa la

⁶ Bolton, William: Ingeniería de control

diferencia entre la consigna de control (setpoint) y el valor actual medido en la salida del proceso. El controlador lleva a cabo la conversión matemática del error y aplica ese resultado al elemento de control final (motor, calentador, etc.). La figura 2.7 muestra un esquema simple de controlador PID:

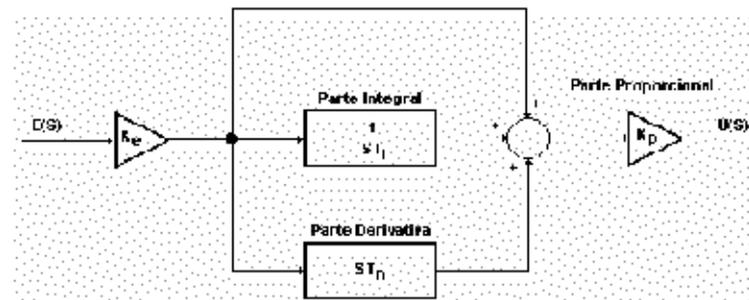


Fig. 2.7. Esquema de controlador PID

Los sensores empleados para la determinación de la posición de los ejes de los motores eléctricos como es el caso de este proyecto, pueden ser de carácter analógico o digital, como discos de plástico transparentes con rayas negras ó ranurados, que al girar a través de detectores ópticos, cortan el haz de luz entre emisor y detector y generan una serie de impulsos eléctricos que sirven al controlador digital para calcular el ángulo desplazado

Cuando se ha determinado un modelo matemático para la planta y obtener los parámetros necesarios, se define el modelo del PID analizado y entonces se puede ajustar ó sintonizar el controlador, existiendo varios métodos para aquello.

2.7. MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN EN CONTROLADORES⁷.

La sintonización es en parte ciencia y en parte un arte de seleccionar valores para los parámetros proporcional, integral y derivativo con los cuales el controlador actúe y elimine un error rápidamente sin que cause una fluctuación excesiva en la variable de proceso. Es muy difícil encontrar un mismo proceso dos ó más veces. Hay diferentes objetivos a ser ejecutados por un controlador. Algunos sistemas tienen interacciones, y de diversa

⁷ Smith y Corripio: Control automático de procesos

magnitud. Cada interacción afecta a la forma en la que esté sintonizado un PID dado. No existe una definición simple del mejor proceso de sintonización que ponga en correcto funcionamiento a todos los lazos de control, por esto una sintonización nada mas no ayudará en todos los casos de manera óptima. La sintonización es parte del diseño del lazo.

La sintonización basada en la teoría de control permite el cálculo de los coeficientes requeridos para implementar un sistema de control partiendo de las propiedades físicas del sistema. Existen varios métodos para resolver cualquier problema de control, sin embargo no todas las soluciones como por ejemplo las características de respuesta del sistema tendrán el mismo criterio.

A continuación se establecen las razones por las que se debe ó no se debe sintonizar un controlador PID.

Se debe sintonizar cuando:

- No se tuvo cuidado en considerar a las constantes, ganancias y otros parámetros.
- La dinámica del proceso no se comprendió apropiadamente, o cuando la misma ha cambiado.
- Algunas características del proceso son dependientes de otros factores.

No se debe sintonizar cuando:

- Elementos como válvulas no responden a los comandos de control
- Los sensores y elementos de medición están averiados ó desconectados.

El término proporcional produce una componente proporcional de salida al error. Incrementar la ganancia resulta en aumentar la sensibilidad al ruido, reduciendo el error de offset y posiblemente induciendo inestabilidad, lo cual hará que la variable del proceso se incremente sin límites.

El término integral se utiliza para eliminar el error de offset casi todas las veces. No es necesario si el sistema bajo control tiene una constante inherente de integración. Al incluir un parámetro que integre el error a través del tiempo, baja considerablemente la desviación del setpoint. A un tiempo integral más corto, más rápido desaparece el error de offset, sin embargo esto creará mayor oscilación y sobreimpulso.

El control derivativo se opone al cambio repentino en la salida. La derivada del error da una indicación del tamaño del sobreimpulso, dándole al sistema de control la posibilidad de “frenar” el sistema antes de que alcance el setpoint. Contrarresta la acción de los controles proporcional y derivativo cuando la salida cambia rápidamente. No tiene efecto en el error final

2.7.1. Métodos analíticos.

Los efectos de variar cada parámetro de los controladores proporcional, integral y derivativo se resumieron en la tabla 2.1. Pero, ¿cómo utilizar esta tabla para el diseño de un controlador PID? Los pasos básicos se resumen como:

- Determinar qué características del sistema necesitan ser mejoradas.
- Seleccionar las ecuaciones apropiadas para el tipo de sistema
- Especificar la respuesta de sistema deseada
- Evaluar parámetros de las ecuaciones
- Calcular coeficientes proporcional, integral y derivativo
- Utilizar el control proporcional (K_p) para reducir el tiempo de subida.
- Utilizar el control derivativo (K_d) para disminuir el sobreimpulso y el tiempo de establecimiento.
- Utilizar el control integral (K_i) para eliminar el error en estado estable.

Esta secuencia funciona en muchos casos, pero ¿cual puede ser además un buen punto de partida para el diseño? Y si los parámetros que se escojan son totalmente errados, ¿Cómo encontrar los valores iniciales fácil y rápidamente? Los métodos estudiados a continuación tienen por característica ser basados en a veces complejos sistemas de ecuaciones, modelos

matemáticos ó en funciones de transferencia, todos inherentes a su comportamiento dinámico, lo que conlleva una mayor dificultad de análisis. Los dos métodos más utilizados y comprensibles son el del lugar geométrico de las raíces y el de respuesta en frecuencia.

- **Método del lugar de las raíces.**

Para los sistemas de control a lazo cerrado, existe el método gráfico del lugar geométrico de las raíces. Basado en la distribución de polos y ceros de la función de transferencia de un sistema a lazo abierto se lo puede analizar a lazo cerrado en función de un parámetro escalar (la mayoría de casos se trata del valor de ganancia a lazo cerrado). Este es un método que se utiliza en el diseño de sistemas de control, y muestra a manera gráfica un bosquejo de aquellos polos y ceros desplazándose en el plano real e imaginario analizando su trayectoria, con los valores que satisfacen la ecuación característica del sistema. Se asemeja entonces a la resolución de una ecuación algebraica cualquiera de n-ésimo grado, donde las respuestas que arroja se grafican tanto las raíces reales como las complejas conjugadas. Simplifica la obtención de resultados en el sistema cuando se varía uno ó más parámetros, lo que es motivo de un nuevo y complicado análisis con técnicas matemáticas.

Uno de los factores importantes que un diseño de control debe conocer es que si el sistema será ó no estable. Se lo puede determinar examinando las raíces obtenidas de la ecuación característica a lazo cerrado:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{KGp(s)}{1 + KGp(s)H(s)} \quad (2.7)$$

Encontrando las raíces, esta manera de análisis indica si el sistema será o no estable, pero no el grado de estabilidad. El lugar de las raíces si puede cuantificar la estabilidad del sistema. Esta aproximación gráfica evidencia el efecto del ajuste de la ganancia con un análisis y diseño más simple. Para la obtención de los polos a lazo cerrado debe encontrarse mediante factorización los valores de S para los cuales el denominador de la ecuación es cero.

$$1 + KG_{(s)}H_{(s)} = 0 \quad (2.8)$$

Con este método se determinan los polos a lazo cerrado en el plano S utilizando la distribución conocida de los polos y ceros a lazo abierto de la función de transferencia $G_0(s)$. Si por alguna circunstancia un parámetro varía, las raíces de la ecuación característica se moverán dentro de la trayectoria de curvas que describan en el plano S tal como se muestra a manera de ejemplo en la figura 2.8. En estas curvas residen todas las posibles raíces a lazo cerrado de la ecuación característica para todos los valores del parámetro a variar desde cero hasta infinito.

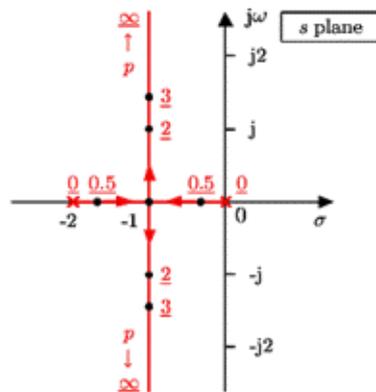


Fig. 2.8. Ploteo de raíces de la ecuación característica $s^2 + 2s + p = 0$, intervalo $0 \leq p \leq \infty$

En la gráfica se sitúan marcas de puntos ó equis sobre el plano, es precisamente la ubicación de polos y ceros. Las líneas en rojo denotan las trayectorias de dichas raíces, se denominan ramas. El lugar de las raíces ha de cumplir ciertas condiciones que se compilan como:

- Condición de magnitud:

$$|G_{(s)}H_{(s)}| = \frac{1}{|K|}; -\infty \leq K \leq \infty \quad (2.9)$$

- Condiciones de ángulo:

$$\begin{aligned} \angle G_{(s)}H_{(s)} &= (2i + 1)\pi, K \geq 0 (\text{impares}) \\ \angle G_{(s)}H_{(s)} &= (2i)\pi, K \leq 0 (\text{pares}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Las condiciones de ángulo determinan las trayectorias del lugar geométrico en el plano S , en cambio la condición de magnitud establecerá el valor de K sobre el lugar geométrico.

Se considerarán todos los valores positivos de K . Mientras K se aproxima a cero, los polos del sistema a lazo cerrado serán los polos de $H(s)$. En el límite de K cuando tiende a infinito, los polos del sistema a lazo cerrado son los ceros de $H(s)$.

No importa que valor de K se tome, el sistema a lazo cerrado siempre tendrá " n " número de polos, que son los mismos de $H(s)$, y tendrá también " n " ramas, cada rama inicia en un polo de $H(s)$ y va hacia un cero de $H(s)$. Si $H(s)$ tiene más polos que ceros (como es a menudo) se dice que $H(s)$ tiene ceros al infinito. En este caso, el límite de $H(s)$ cuando S tiende a infinito es cero. El número de ceros al infinito es $(n - m)$ y también el número de ramas que van hacia el infinito (asíntotas). En la figura 2.9 se muestra el gráfico de lugar de las raíces con un cero (raíz real) en -2 y un polo (complejo conjugado) de $\pm 2j\omega$.

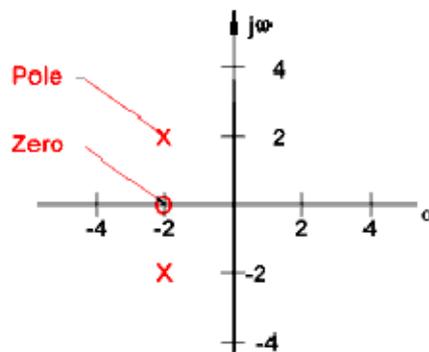


Fig 2.9. Lugar de las raíces para la raíz compleja conjugada $-2 \pm 2j\omega$

El procedimiento en resumidas cuentas se interpreta como:

- A partir de la función de transferencia a lazo cerrado, factorizar y encontrar el polinomio de la ecuación característica.
- Encontrar las raíces de aquel polinomio.
- Ubicar las raíces en el plano S .
- Analizar para el intervalo de variación de K .

El software como herramienta gráfica es muy útil para esta tarea, ya que puede abarcar todo el procedimiento, desde el ingreso de la función de transferencia hasta el ploteo final del lugar de las raíces. En breve detalle se ilustra cómo se genera una gráfica del lugar de las raíces:

Para una función de transferencia a lazo abierto:

$$G_0(s) = \frac{K_0(s+1)}{s(s+2)(s^2+12s+40)} \quad (2.11)$$

El grado del polinomio del numerador es $m = 1$, significa que la función de transferencia tiene un cero ($z_1 = -1$). El grado del polinomio del denominador es $n = 4$ y se tiene cuatro polos ($p_1 = 0, p_2 = -2, p_3 = -6+j2, p_4 = -6-j2$). Los polos (representados en la gráfica con una x) y los ceros (representados por una o) del lazo abierto se grafican en el plano S como se muestra en la figura 2.10. Estos polos son aquellos puntos del lugar de las raíces donde K se hace cero, y en los ceros el lugar donde K tiende a infinito.

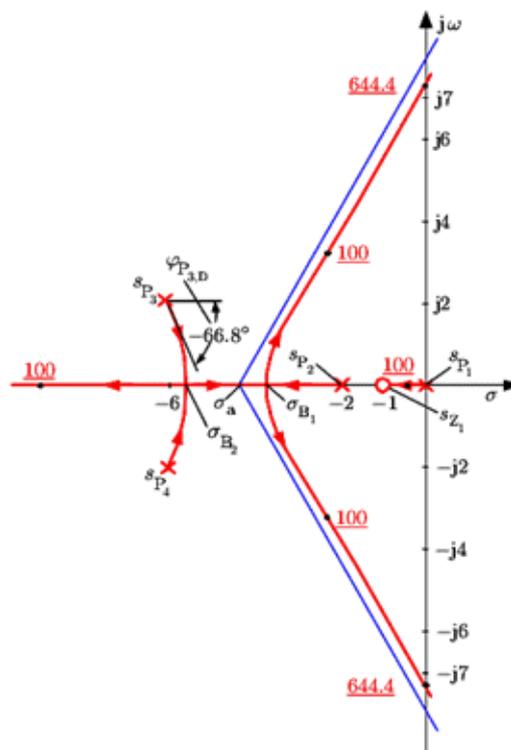
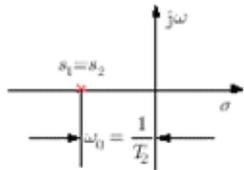
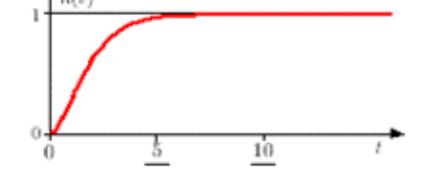
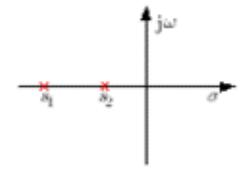
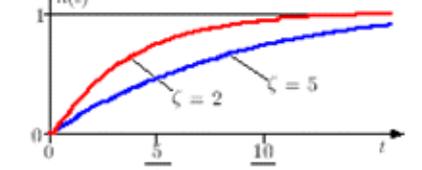
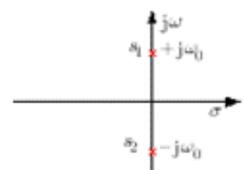
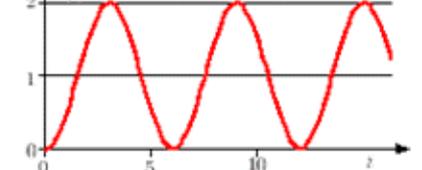
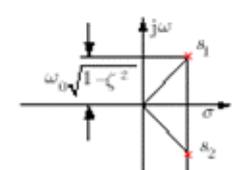
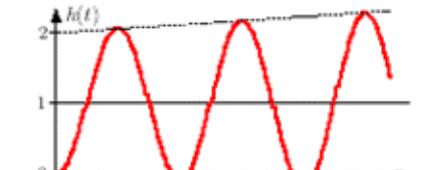


Fig. 2.10. Lugar de las raíces para $G_0(s)$

El número de ramales que tiende al infinito viene dado por $(n - m) = 3$ y sus asíntotas en azul intersecan el eje real.

Las posiciones de polos y ceros involucran a la respuesta de un sistema al escalón unitario como se muestra en la tabla 2.2. con una función de transferencia que posee un denominador de segundo orden:

Tabla 2.2. Posiciones de polos en el plano S y respuestas al escalón para elementos con una función de transferencia $G(s) = 1/[1 + 2s\zeta / \omega_0 + (s / \omega_0)^2]$

Epsilon	Posición de los polos	Respuesta escalón
$0 < \zeta < 1$		
$\zeta = 1$		
$\zeta > 1$		
$\zeta = 0$		
$-1 < \zeta < 0$		

- **Método de la respuesta en frecuencia**

La respuesta de frecuencia es una representación de la respuesta del sistema a una entrada sinusoidal a varias frecuencias. La salida de un sistema lineal a la entrada sinusoidal será una senoide de la misma frecuencia pero con diferente magnitud y fase. Este término se define como la diferencia de magnitud y fase entre las señales sinusoidales de entrada y salida.

El método de respuesta de frecuencia puede ser menos intuitivo que otros, sin embargo tiene ciertas ventajas especialmente en situaciones reales como el modelado de datos físicos para la obtención de su función de transferencia. La respuesta de frecuencia en un sistema puede visualizarse de dos maneras: por diagramas de Bode ó por diagramas de Nyquist. Ambos despliegan la misma información, la diferencia reside en la manera cómo la presentan. Las definiciones se dan empezando de la función de transferencia y su representación gráfica en el dominio de la frecuencia y de la experimentación entrada – salida utilizando entradas sinusoidales. Un ejemplo de sistema de control aplicado una entrada de prueba seno y los parámetros resultado de la respuesta en frecuencia se muestra en la figura 2.11.

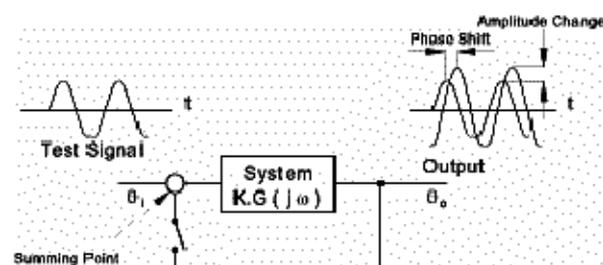


Fig. 2.11. Sistema analizado en su respuesta de frecuencia

Varias consideraciones se toman también en este método, por ejemplo en un sistema a lazo cerrado, si a alguna frecuencia la señal no denota cambio en amplitud pero está desplazada en fase 180° (π rad) el sistema se volverá inestable. La señal de realimentación que llegará al punto de suma reforzará la señal de entrada, resultando en una señal de realimentación 100% positiva. En un sistema de control de posición a lazo abierto cuando se aplica una señal de prueba continua ($\omega = 0$) resultará en que el motor que impulsa este sistema

permanecerá corriendo continuamente, con la consecuencia de un incremento sin límite de la posición de salida. En cambio una señal de elevada frecuencia producirá una salida de cero debido a que la inercia del sistema va a prevenir el movimiento oscilatorio.

Obviamente se debe partir de la función de transferencia, que sustituye a la variable S por $j\omega$, no es más que poner en términos de la frecuencia compleja. Para un sistema lineal e invariante en el tiempo se aplica una señal de entrada senoidal del tipo:

$$r(t) = R \text{Sen} \omega_0 t \quad (2.12)$$

Como se mostró en la figura 2.12., a la salida del sistema de control aparece una onda senoidal claramente desplazada (phase shift) en fase y de una amplitud mayor (amplitude change). Este cambio expresado en forma de ecuación se define como:

$$y(t) = Y \text{Sen}(\omega_0 t + \phi) \quad (2.13)$$

donde $y(t)$ es la onda senoidal de salida, Y es su amplitud, ϕ es el desplazamiento en fase en radianes ó grados. El detalle de estos parámetros se muestra en la figura 2.12 con la visualización de la forma de onda y su respectiva notación vectorial.

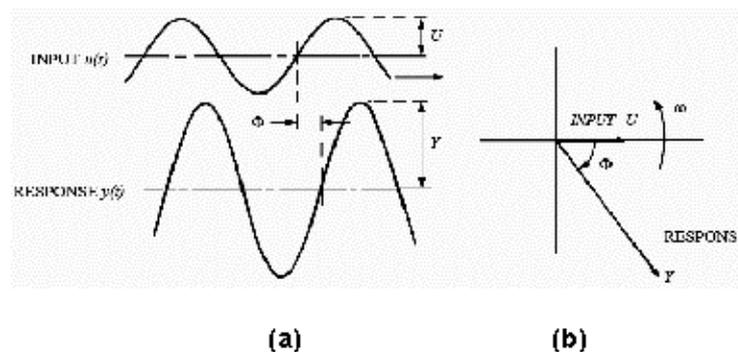


Fig. 2.12. (a) Entrada de onda senoidal y su respuesta en estado estable; (b) Notación vectorial de las misma ondas de entrada y salida

Para sistemas a lazo cerrado, con función de transferencia:

$$M(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.14)$$

Al aplicar la transformación de la variable compleja queda:

$$M(j\omega) = \frac{G(j\omega)}{1 + G(j\omega)H(j\omega)} \quad (2.15)$$

Esto puede quedar en términos de su magnitud y fase en la siguiente forma:

$$M(j\omega) = |M(j\omega)| \angle M(j\omega) \quad (2.16)$$

La respuesta en frecuencia $M(j\omega)$ es una cantidad físicamente interpretable y medible. Para mostrar esto, esta misma respuesta en frecuencia puede ser representada por la entidad compleja:

$$H(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega) \quad (2.17)$$

con la parte real $R(\omega)$ y la parte imaginaria $jI(\omega)$, y la respuesta en amplitud y fase en notación polar se representa como:

$$H(j\omega) = Y(\omega)e^{j\phi(\omega)} \quad (2.18)$$

Para graficar la respuesta en frecuencia, es necesario crear un vector de frecuencias positivas (variando desde cero hasta infinito) y contabilizar el valor de la función de transferencia del sistema a aquellas frecuencias. Si $G(j\omega)$ es la función de transferencia a lazo abierto en el dominio de la nueva variable y ω es el vector de frecuencia, entonces la gráfica se hará con $G(j\omega)$ respecto a ω . La figura 2.13 muestra una medición típica de respuesta en frecuencia graficada en dos formas: La primera utiliza la forma compleja de la respuesta en frecuencia, es un diagrama de la parte imaginaria respecto a la parte real

ambos ejes en forma lineal, y es conocida como el diagrama de Nyquist. La segunda es desarrollada con la función de transferencia $G(j\omega)$ respecto al vector de frecuencia ω , expresados ambos parámetros de forma logarítmica en los ejes. Así, para el diagrama de Nichols se representan las componentes real e imaginaria en sus respectivos ejes, y en el diagrama de Bode los ejes poseen escala logarítmica y se representarán los parámetros de magnitud y fase.

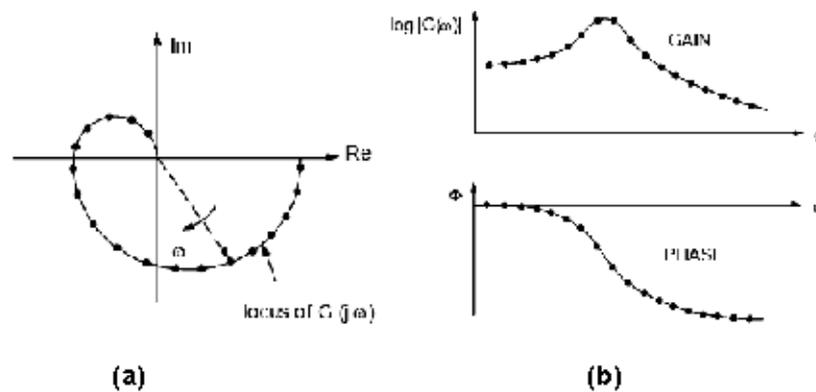


Fig. 2.13. (a) Presentación de los datos de respuesta en frecuencia por diagrama de Nichols; (b) Presentación de los datos en diagrama de Bode

El análisis de respuesta en frecuencia presenta ventajas y desventajas.

Ventajas:

- La prueba envuelve mediciones bajo condiciones de estado estable que son más simples de analizar comparadas a mediciones de respuestas transitorias.
- Las pruebas se realizan en sistemas a lazo abierto los cuales no son sujetos de problemas de inestabilidad.
- Los resultados brindan acceso conveniente al orden del sistema de control, ganancia, constantes de error, frecuencias de resonancia, etc.
- Es flexible con respecto a los diferentes sistemas, aplicándoles una señal de entrada a una frecuencia a la vez y cambiando la amplitud de la señal senoidal en cada frecuencia.
- Este método es altamente selectivo en frecuencia y puede por tanto rechazar ruido e interferencia a la salida.

- Puede manejar de mejor manera los sistemas no lineales.

Desventajas:

- No es siempre fácil de deducir las características de respuesta transitoria a partir de una prueba de respuesta en frecuencia.
- No recomendado para bajas frecuencias, entre 0 y 10 Hz.
- Sólo se recomienda utilizar frecuencias bajas si el sistema tiene una dinámica lenta.

▪ Diagramas de Bode

Reiterando el concepto del diagrama de Bode, es una representación gráfica que sirve para caracterizar la función de transferencia de un sistema en función de la frecuencia. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde con la *magnitud* de dicha función y otra que corresponde con la *fase* ambas ploteadas respecto a la frecuencia, y particularmente los diagramas de Bode poseen dos ventajas fundamentales:

- Permite graficar de manera independiente las distintas partes de la función de transferencia.
- Muestra una gráfica linealizada de la función de transferencia.

Los factores que se involucran en la realización de los diagramas de Bode son la ganancia del sistema, sus polos y sus ceros. La magnitud resultante se compone de los elementos individuales que constituyen a la función de transferencia:

$$|G(j\omega)| = |G_1(j\omega)||G_2(j\omega)||G_3(j\omega)|\dots \quad (2.19)$$

La escala de los diagramas de Bode es logarítmica, ya que de esta manera son apreciadas de mejor manera las variaciones de la curva tanto de magnitud como de fase, suavizándolas en cierto modo, que de graficarse en forma lineal serían muy bruscas. La forma del logaritmo para la función de transferencia detallada en la ecuación (2.15) será:

$$\log|G(j\omega)| = \log|G_1(j\omega)| + \log|G_2(j\omega)| + \log|G_3(j\omega)| \dots \quad (2.20)$$

Tales términos individuales, que estaban dispuestos como un producto entre ellas, en la gráfica de magnitud se sumarán y resultará un bosquejo aproximado de la traza de Bode para dicho sistema por sumatoria de pendientes, ya que como rectas que se intersecan forman asíntotas pero puede delinear una trayectoria exacta basada en estas asíntotas. La forma de representación más usual del logaritmo base diez de una magnitud es el decibel (*dB*), equivale a:

$$\text{Ganancia}(dB) = 20 \text{Log}|G(\omega)| \quad (2.21)$$

Para la traza de Bode en magnitud se toma en cuenta la suma de magnitudes en forma de decibeles, en cambio para la traza de fase existe el aporte de cada polo y cero del sistema. Una ganancia pura no aporta a la traza de fase, un polo en el origen del diagrama aporta con -90° por decibel ó década, un cero en el origen con $+90^\circ$ por década, y así varía con cada parámetro. En la figura 2.14 se muestra el procedimiento de suma de magnitudes para la traza de magnitud:

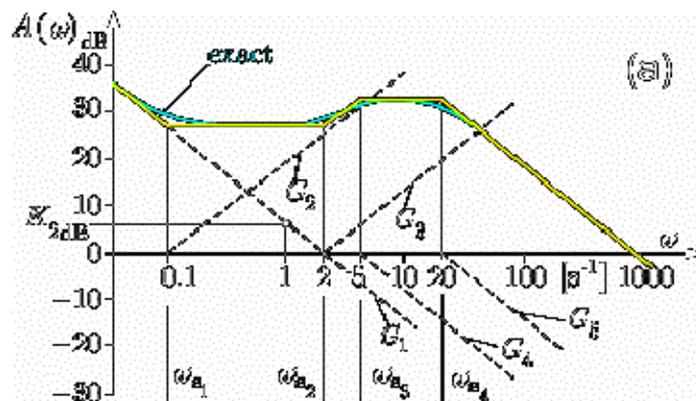


Fig. 2.14. Suma de magnitudes en el diagrama de Bode para obtener la curva real

Para la traza de fase del diagrama, en breve detalle se muestran en las figuras 2.15 a la 2.19 los pteos de bode para los casos más comunes de polos y ceros, que originan el aporte en grados a la traza antes mencionada.

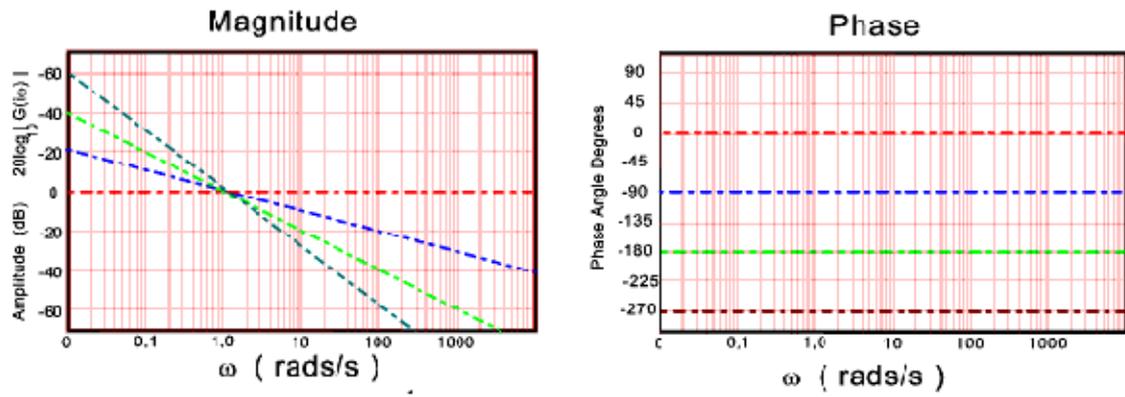


Fig. 2.15. Ploteo de bode para un polo en el origen ($1/j\omega$)

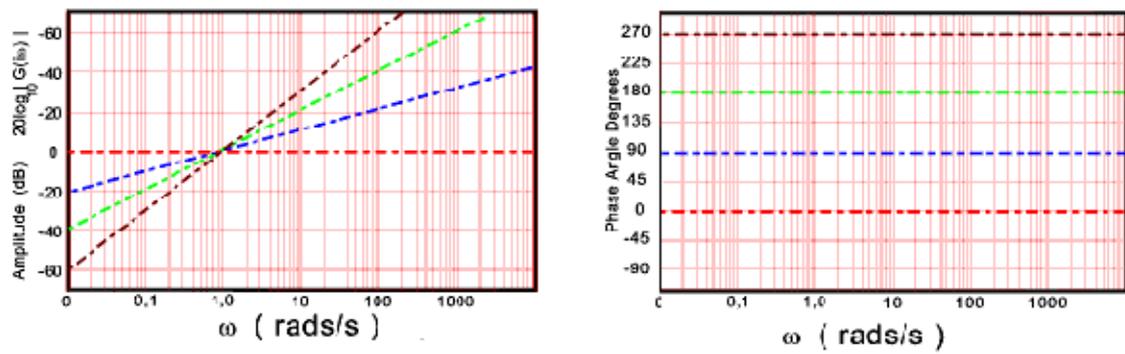


Fig. 2.16. Ploteo de bode para un cero en el origen ($j\omega$)

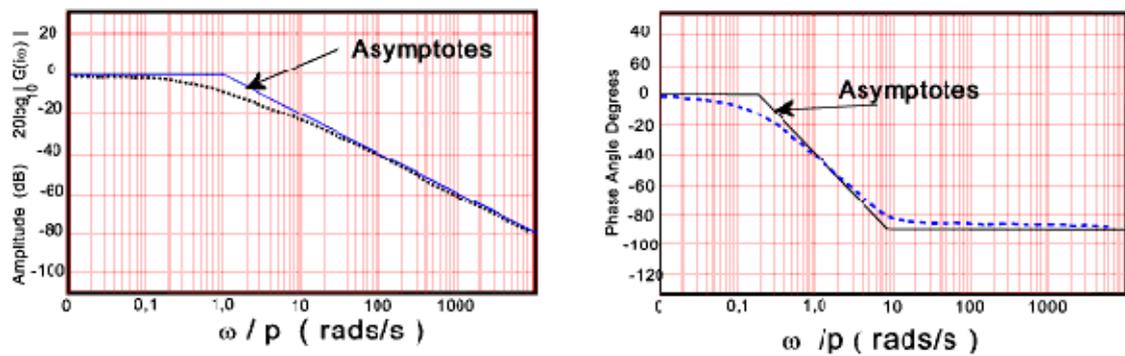


Fig. 2.17. Ploteo de bode para un polo desplazado del origen ($1/(1+j\omega/p)$)

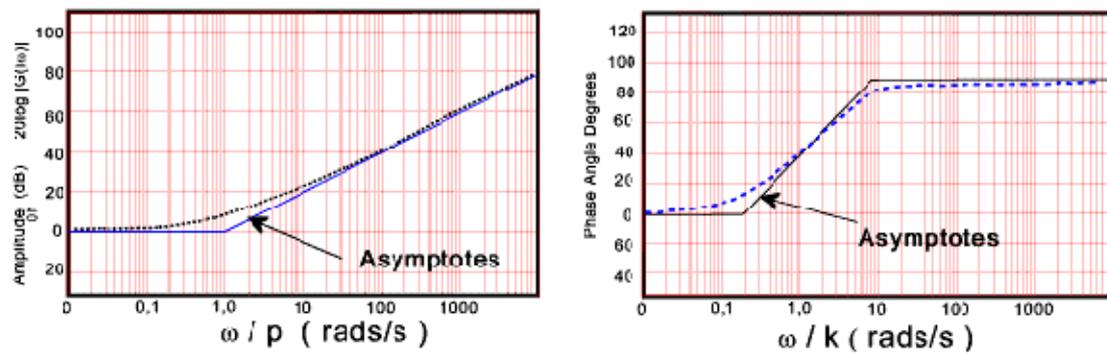


Fig. 2.18. Ploteo de bode para un cero desplazado del origen $(1+(j\omega/k))$

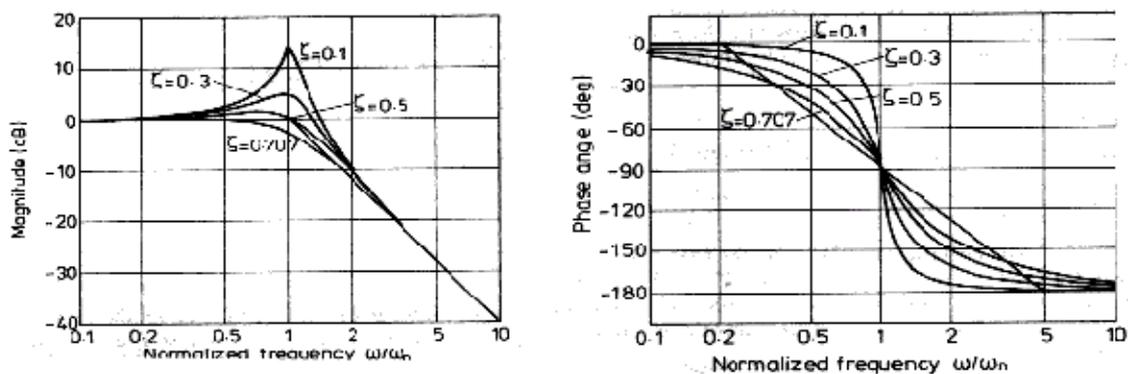


Fig. 2.19. Ploteo para polos ó ceros complejos conjugados de $1/(1+j2\zeta\omega/\omega_n - \omega^2/\omega_n^2)$, $0 \leq \zeta \leq 1$

2.7.2. Métodos experimentales⁸.

- *Método de tanteo*: Tiene su significación en el concepto de ensayo trivial del proceso en marcha. Implica un método de sintonizar al controlador que popularmente se lo denominaría “a pulso” y que se lo comprende y ejecuta gracias a un cierto grado de experiencia en manejo de controladores. Precisamente se inicia el método de tanteo para los diferentes tipos de controladores ingresando al sistema valores arbitrarios iniciales en las constantes proporcional, integral y derivativa (por regla general, $K_p=1$, $K_i=0$ $T_d=0$), dejando al proceso correr por si solo. En la experimentación casi siempre se incrementa de forma gradual primero la constante proporcional hasta un punto límite en que llegan a darse oscilaciones. Posteriormente, desplazar el punto de consigna fluctuando en porcentajes pequeños ($\pm 5\%$) realizando cambios en la carga del proceso para observar la magnitud de perturbación, tal que no haga al proceso tender a la

⁸ Umez: Dinámica de sistemas de control

inestabilidad. Si lo hace, hay que sintonizar las dos constantes adicionales, preferiblemente alternadas para aumento ó disminución ya que las constantes integral y derivativa se contrarrestan para junto a la constante proporcional brindar una respuesta rápida y estable de control al proceso. Según la dinámica de cada proceso, este método tardará mayor ó menor tiempo para verificar la respuesta ante la perturbación.

- *Método de ganancia límite:* Es un método a lazo abierto con el cual se relacionan los parámetros de proceso (tiempo de retardo, ganancia de proceso y constante de tiempo) con los parámetros de controlador (ganancia proporcional y tiempo de reseteo), conocido también por sus postulantes J.G. Ziegler and N.B. Nichols. Es un método de sintonización heurístico que pretende determinar los valores ideales para las tres constantes del controlador PID: La constante proporcional K_p , las constantes de tiempo integral y derivativa T_i y T_d . Para este método el lazo se prueba con el controlador en modo automático y una baja ganancia sólo proporcional. Al incrementar poco a poco la ganancia, la más baja a la cual un lazo proporcional empezará a hacer que el proceso oscile con amplitud constante se denomina ganancia límite, y el período de aquellas oscilaciones se denomina período límite. Las constantes proporcional, integral y derivativa y sus valores se deducen de aquella ganancia límite a la cual las oscilaciones son sostenidas y del período de oscilación a esa ganancia. El método debe producir parámetros de sintonización que obtendrán un decaimiento de cuarto de onda (25%). Medidos ganancia (GL) y período (PL) límite las constantes PID se establecen según la tabla 2.3, y una representación de los parámetros medidos se muestra en la figura 2.20.

Tabla 2.3. Valores de sintonización para los tipos de controladores según parámetros de ganancia límite

Controlador	Ganancia	Integral	Derivativo
P	0.5GL	-	-
PI	0.45GL	1.2/PL	-
PID	0.6GL	2/PL	PL/8

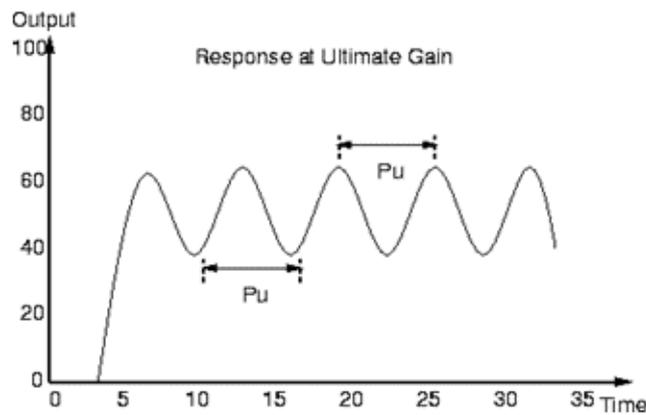


Fig. 2.20. Curva de ganancia límite y sus parámetros

- *Método curva de reacción:* En ciertas aplicaciones de planta industriales por ejemplo a menudo no es posible, recomendado ó permitido manejarla para provocar en ella oscilaciones permanentes y obtener una ganancia crítica. En cambio, para estos casos interviene la respuesta del sistema a lazo abierto al escalón unitario, es decir se abre el bucle de realimentación y es aplicada una señal escalón en modo manual como punto de consigna. El cambio en la señal de entrada es súbito, pero el proceso reflejará una curva exponencial creciente de la cual dependerán los parámetros a deducir, la curva se muestra en la figura 2.21.

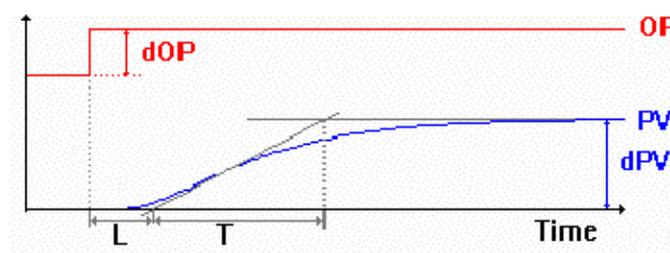


Fig. 2.21. Curva de reacción a una entrada escalón

El método guarda semejanzas con su versión a lazo cerrado, que es la ganancia límite; comienza aplicando un escalón unitario a la planta en lazo abierto, determina los parámetros de proceso como ganancia, tiempo muerto, constante de tiempo. La fuente principal de estos datos viene en la recta tangente a la parte lineal creciente de la curva, tal como se puede apreciar con mayor claridad en la figura 2.22.

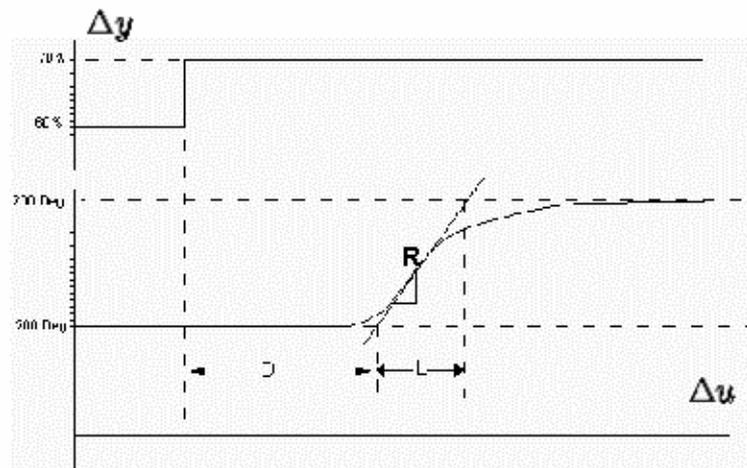


Fig. 2.22. Recta tangente a la curva de reacción

“ R ” es la pendiente de la tangente en el punto de inflexión de la curva. Si se aproxima el proceso a uno de primer orden su función de transferencia es:

$$F_{transf} = \frac{K * e^{-Ds}}{1 + Ls} \quad (2.22)$$

donde K = ganancia; D = tiempo de retardo del proceso; L = constante de tiempo del proceso. En el punto de inflexión de la curva obtenida se traza una recta tangente y se mide la pendiente dada por la constante de tiempo (L), la ganancia de estado estable (proyección del eje Y con recta tangente) y el retardo ó tiempo muerto (D). Finalmente sustituir los valores en la tabla 2.4. para obtener los parámetros relevantes.

Tabla 2.4. Valores asignados para los diferentes tipos de controles

Controlador	Ganancia	Reseteo	Derivativo
P	$(L \Delta u) / (D \Delta y)$	-	-
PI	$(0.9 L \Delta u) / (D \Delta y)$	3.3 D	-
PID	$(1.2 L \Delta u) / (D \Delta y)$	2.0 D	0.5 D

2.8. CRITERIOS DE ESTABILIDAD⁹.

La estabilidad es el requerimiento básico para la culminación del diseño de un sistema de control. Involucra el diseño de sistemas de control a lazo cerrado y el problema de su estabilidad. La estabilidad de un sistema se relaciona con su respuesta a una señal de entrada ó debida a perturbaciones. Un sistema que permanece en un estado de salida constante a menos que sea afectado por una acción externa, y que vuelve a su estado constante cuando cesa la acción externa puede considerarse estable. Esta afirmación engloba la idea de estabilidad absoluta, la cual se resume en determinar si el sistema es o no estable. Cuando se desea cuantificar, establecer un cierto grado de estabilidad se maneja el concepto de estabilidad relativa, que se expresa en términos de un parámetro del sistema que sufra variación y dentro del cual el sistema sea estable. Varios son los métodos en sistemas de control para la determinación de un criterio de estabilidad, mencionando sólo algunos de ellos:

- Criterio de estabilidad de Routh – Hurwitz
- Criterio de estabilidad de Nyquist
- Criterio de estabilidad de Lyapunov
- Criterio de estabilidad para sistemas robustos

Uno de los criterios de estabilidad algebraicos más utilizados es el de Routh. La estabilidad de un sistema puede tener varias definiciones en función de su respuesta a señales de entrada impulso ó en base a su respuesta a entradas acotadas ó de magnitud finita:

- Un sistema es estable si su respuesta al impulso unitario se aproxima a cero cuando el tiempo se aproxima al infinito (estabilidad asintótica).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0 \quad (2.23)$$

⁹ Dorf, Richard: Sistemas de control moderno

- Un sistema lineal e invariante en el tiempo es estable si presenta una salida acotada ó finita al aplicarse una señal de entrada acotada. La figura 2.23 muestra gráficas de las respuestas resultantes de una entrada acotada.

En esta última definición se analiza al sistema si posee o no la propiedad de obtener salida acotada en respuesta a una entrada acotada, de no cumplir tenderá a ser inestable.

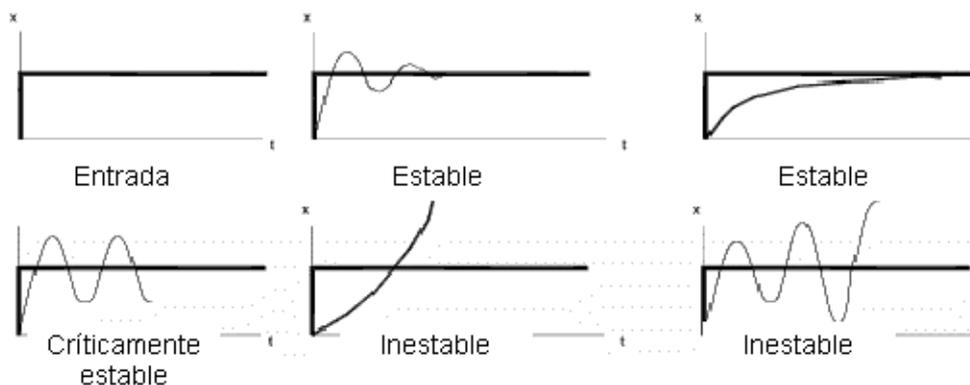


Fig. 2.23. Respuesta de un sistema a señal acotada de entrada (escalón)

Para aclarar los conceptos de cada clase de estabilidad según condiciones en el plano “ S ” tratado en el lugar de las raíces son:

- Estabilidad asintótica: Cuando todos los polos de la función de transferencia recaen en la mitad izquierda del plano s .
- Críticamente estable: Un sistema es críticamente estable si al menos un polo se ubica en el eje imaginario, ningún polo se sitúa en la mitad derecha del plano s y además no hay polos múltiples en el eje imaginario.
- Inestabilidad: Al menos un polo de su función de transferencia está en la mitad derecha del plano S , o al menos un polo múltiple se encuentra en el eje imaginario de dicho plano.

Se ha mostrado que la estabilidad de sistemas lineales puede determinarse con la distribución de las raíces de la ecuación característica en el plano S . Para problemas de control a menudo no se requiere conocer estas raíces con gran precisión. Lo que interesa

saber en un análisis de estabilidad es dónde recaen las raíces dentro del plano, observando si existen en la mitad izquierda para la estabilidad. Por tanto se dispondrá un criterio simple para el chequeo de estabilidad, el cual posee parte de análisis algebraico, parte análisis gráfico. La figura 2.24 muestra la ubicación de raíces en el plano s y su incidencia para la estabilidad de un sistema.

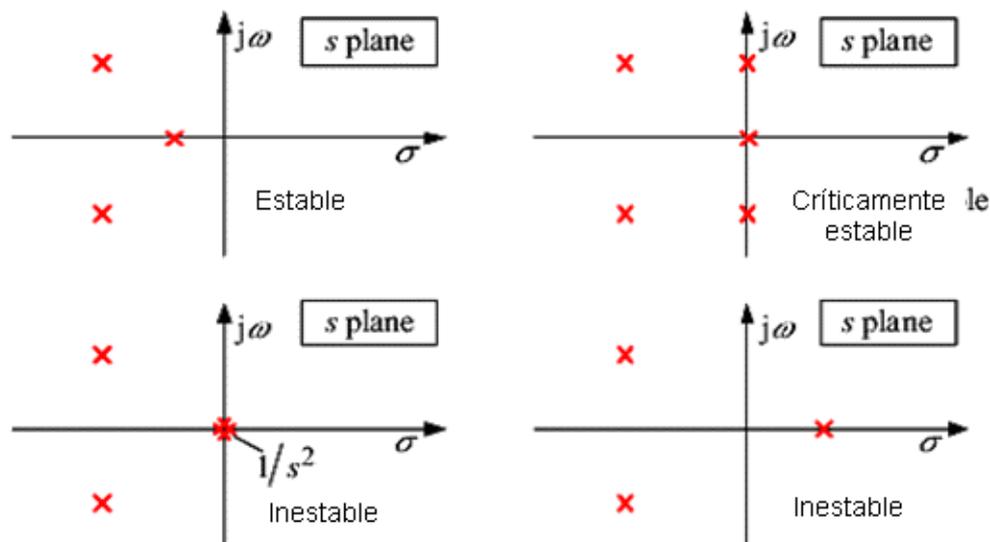


Fig. 2.24. Estabilidad de un sistema lineal determinado por la distribución de raíces de la ecuación característica en el plano S .

El análisis de estabilidad utiliza tanto medios gráficos como algebraicos, y estos últimos se fundamentan en polinomios característicos de n -ésimo orden. El sistema será estable cuando todas las raíces del denominador de la función de transferencia (ceros) están ubicados en la parte izquierda del plano S (parte real negativa)¹⁰ como se muestra en la figura 2.25, una función de transferencia tendrá por ejemplo:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2 \dots}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2 \dots} = M(s) \quad (2.24)$$

$$C(s) = b_0 s^2 + b_1 s + b_2 = 0 \quad \text{Ceros}; \quad R(s) = a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0 \quad \text{Polos}$$

$$\text{Soluciones: } s_1 = \delta_1 + j\omega_1; \quad s_2 = \delta_2 + j\omega_2$$

¹⁰ Kúo, Benjamín: Sistemas de control automático

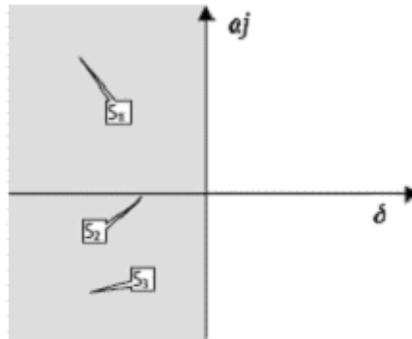


Fig. 2.25. Ubicación de las soluciones en el plano complejo

2.8.1. Criterio de estabilidad de Routh.

Este método provee una forma conveniente de determinar la estabilidad de un sistema de control. Cuando se trata de resolver ecuaciones de segundo grado ó de mayor complejidad, se recurre a aplicar criterios como el de Routh. Nos permite determinar las raíces del polinomio que ocupen el lado inestable del plano s (derecho) y el número de raíces tanto en el lado estable del plano (izquierdo) como las raíces en el eje imaginario. Este método llega a obtener estos parámetros sin resolver la ecuación. También se utiliza el método para establecer valores límite para una variable entre los cuales el sistema se volverá inestable. La ecuación característica para el análisis de estabilidad es generalmente de la forma:

$$a_n s^n + a_{n-1} s_{n-1} + \dots a_1 s + a_0 = 0 \quad (2.25)$$

La tabla de Routh se genera de la forma como se muestra en la tabla 2.5:

Tabla 2.5. Tabla de Routh

		Columna 1	Columna 2	Columna 3
Fila 0	s^n	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}
Fila 1	s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}
Fila 2	s^{n-2}	b_1	b_2	b_3
Fila 3	s^{n-3}	c_1
.
.
Fila n-1	s^1	y_1	y_2	
Fila n	s^0	z_1		

Los elementos de las filas 3 en adelante se calculan de la siguiente manera: El numerador en cada caso se forma por elementos en las dos filas por sobre el elemento a ser calculado. Utilizando el valor en la columna 1 (columna pivote) y el valor de la columna a la derecha del elemento a ser calculado. El denominador es el elemento en la columna pivote en la fila por sobre el elemento a ser calculado. Viene a ser una especie de multiplicación en cruz de las dos filas que anteceden al valor a calcular:

$$b_1 = \frac{(a_{n-1} \cdot a_{n-2} - a_n \cdot a_{n-3})}{a_{n-1}}$$

$$b_2 = \frac{(a_{n-1} \cdot a_{n-4} - a_n \cdot a_{n-5})}{a_{n-1}} \dots \quad (2.26)$$

$$c_1 = \frac{(b_1 \cdot a_{n-3} - a_{n-1} \cdot b_2)}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{(b_1 \cdot a_{n-5} - a_{n-1} \cdot b_3)}{b_1} \dots \quad (2.27)$$

El procedimiento de verificación debe cumplir las siguientes condiciones:

- Condición necesaria: que el polinomio este completo y no tenga coeficientes negativos.

$$R(s) = a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s_{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot s + a_n = 0 \quad (2.28)$$

Deben existir todos los $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n$

Todos estos términos positivos: $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n \geq 0$

- Condición suficiente: Que todos los términos de la primera columna de la distribución adjunta tengan el mismo signo. El número de cambios de signo indica las raíces reales positivas del polinomio.

$$\begin{array}{r}
 |s^n| \\
 \parallel \\
 |s^{n-1}| \\
 \parallel \\
 |s^{n-2}| \\
 \parallel \\
 |s^{n-3}| \\
 \parallel \\
 |s^{n-4}| \\
 \vdots \\
 |s^0| k
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 a_0, a_2, a_4, a_6, \dots \\
 a_1, a_3, a_5, \dots \\
 c_1, c_2, c_3, \dots \\
 d_1, d_2, \dots \\
 \vdots \\
 k
 \end{array}
 \quad (2.29)$$

Para la estabilidad del sistema el requisito principal es que todas las raíces de la ecuación característica tengan parte real negativa. Esto se cumple cuando los elementos en la primera columna de la tabla Routh tienen el mismo signo. El número de cambios de signo en dicha columna es igual al número de raíces de la ecuación característica con parte real positiva.

▪ Casos especiales para resolver una tabla de Routh

Dependiendo de cada coeficiente de la ecuación en la construcción de la tabla de Routh, ciertos valores acarrearán condiciones de indeterminación que dificultan resolverla:

- Si un cero aparece en la primera columna de cualquier fila de la tabla y los restantes términos son diferentes de cero; indicará una estabilidad marginal ó la inestabilidad total. La indeterminación surge por la división para cero en esa columna, un método conveniente de resolverlo es reemplazar aquel cero por un número infinitesimal (δ), un valor muy pequeño que se aproxime a cero y continuar la operación en la tabla normalmente. El límite cuando δ tiende a cero es entonces determinado y se chequea la primera columna por cambios de signo. La tabla 2.6. muestra un ejemplo de este caso, para un sistema inestable.

Tabla 2.6. Tabla de Routh para la función $F(s) = s^5 + 2s^4 + 2s^3 + 4s^2 + s + 1$

		Columna 1	Columna 2	Columna 3
Fila 0	s^5	1	2	1
Fila 1	s^4	2	4	1
Fila 2	s^3	δ	0.5	
Fila 3	s^2	$-1/\delta$	1	
Fila 4	s^1	0.5	0	
Fila 5	s^0	1		

- Si todos los elementos de una fila cualquiera es cero, indica tres nuevas posibilidades: (a) existen raíces reales iguales con signos diferentes, (b) raíces imaginarias puras, (c) raíces complejas conjugadas simétricas al plano S . Esto indicará la utilización de un polinomio característico con los coeficientes de la última fila, que se dividirá exactamente para la fila inmediata superior a la fila con todos los elementos cero (el polinomio siempre será par). Se lo puede denominar polinomio $N(s)$. Esto también indica la presencia de raíces que serán todas simétricamente dispuestas respecto al origen tal como se muestra en la figura 2.26.

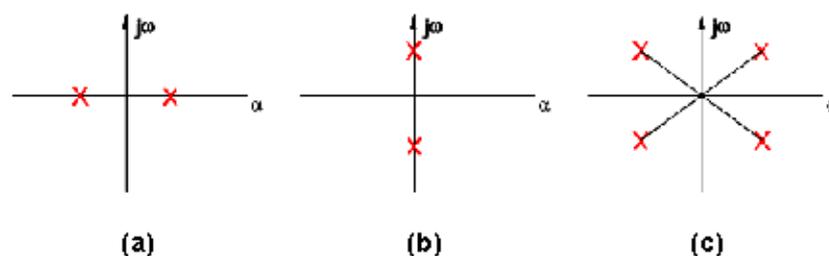


Fig. 2.26. Representación gráfica de las raíces para casos especiales

2.9. ARQUITECTURA DE MICROCONTROLADORES EN GENERAL ¹¹.

Para brindar una introducción breve acerca de los microcontroladores, como lo sugiere el nombre, son pequeños controladores. Se pretende describir algunas de las características básicas de los microcontroladores y varios criterios al momento de escoger a un microcontrolador en particular.

Básicamente el microcontrolador es un dispositivo que integra varios componentes de un sistema microprocesado en un solo chip. Se consideran dispositivos dedicados, ya que difieren de sistemas de propósito general como lo son procesadores de PC, al ser diseñados para la ejecución de un solo tipo de tarea. Poseen componentes adicionales que permiten controlar dispositivos externos, y entra a funcionar como unidad de procesamiento y control. Un diseñador de sistemas de control tendrá en cuenta las funcionalidades de un microcontrolador dado, por ejemplo para:

- Captar señal de sensores.
- Procesar estas señales para determinar una lista de acciones.
- Manejar los dispositivos de salida desde el microcontrolador para acción de control.

Todos los sistemas basados en microprocesador (computador personal, mainframe ó microcontrolador) guardan similitudes:

- Todas tienen una CPU (unidad central de procesamiento) que ejecuta programas y posee el control del dispositivo.
- La CPU debe cargar el programa a ser ejecutado de alguna parte, lo que en microcontroladores se denomina memoria de programa.
- Debe poseer una memoria de acceso aleatorio (RAM) para almacenar temporalmente variables de programa.
- No deben faltar los dispositivos de entrada y salida con los cuales pueda interactuar con el entorno y el usuario.

¹¹ www.wikipedia.com

Las fortalezas más importantes de los microcontroladores incluyen:

- Alta integración de funcionalidades: Los microcontroladores a veces se los denomina computadores de un solo chip porque poseen procesador y memoria interna, además circuitería de entrada – salida y otros componentes que habilitan su funcionamiento por sí solo.
- Flexibilidad de uso y programación: A menudo utilizan memoria tipo EEPROM ó EPROM como dispositivos de almacenamiento, lo cual permite su flexibilidad de uso y de programación, utilizando un lenguaje con instrucciones sencillas.

Parámetros más específicos de microcontroladores se pueden describir como:

- Los microcontroladores son sistemas “embebidos” dentro de otros dispositivos, por lo cual ejercen el control de acciones de dichos productos.
- Son dispositivos dedicados a una sola tarea y a correr un solo programa específico almacenado en la memoria de sólo lectura (ROM).
- Tienden a ser de bajo consumo de energía, en el orden de pocos milivatios.
- Posee un dispositivo dedicado de entrada y a menudo pero no en todos los casos un dispositivo de salida, por lo general una pantalla LCD. También el microcontrolador toma señal de entrada de uno ó varios dispositivos que esté controlando y ejerce acciones de control sobre el mismo.
- La mayoría de microcontroladores son de tamaño y precio reducido. Los componentes se han escogido para minimizar el tamaño y que a la vez sea lo más económico posible.

Los elementos básicos del microcontrolador se muestran en la figura 2.27. Entonces un microcontrolador combina en el mismo chip:

- El microprocesador ó CPU.
- Memoria (RAM y ROM)

- Puertos de entrada y salida para comunicación y control
- Circuito de reloj interno ó externo

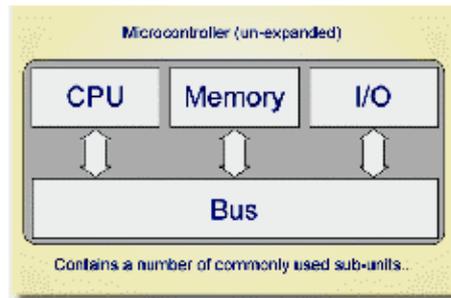


Fig. 2.27. Esquema simplificado de la estructura interna del microcontrolador

Para la puesta en funcionamiento de un microcontrolador en proyecto, se recomienda seguir determinados pasos:

- Definir la tarea.
- Diseñar y construir el circuito.
- Escribir el programa de control.
- Pruebas y correcciones.

A veces los pasos no siguen este orden. Se puede empezar escribiendo las líneas de código del programa antes de construir el circuito, ó se puede construir y probar parte del circuito antes de empezar a programar.

La mayoría de microcontroladores también combinan otros dispositivos como:

- Temporizadores
- Comparadores
- Comunicación serial o de cualquier otro tipo
- Módulos conversores analógico a digital (ADC) y digital a analógico (DAC)

2.9.1. Diagrama general de un microcontrolador¹².

El microcontrolador posee una amplia gama de dispositivos encapsulados en un solo circuito integrado, característica común a todos los fabricantes son los elementos básicos representados frecuentemente en diagramas de bloque para mostrarlos en su interconexión y ubicación en el chip, viene dada en la hoja de datos del microcontrolador. El diagrama esquemático general del microcontrolador se aprecia detalladamente en la figura 2.28.

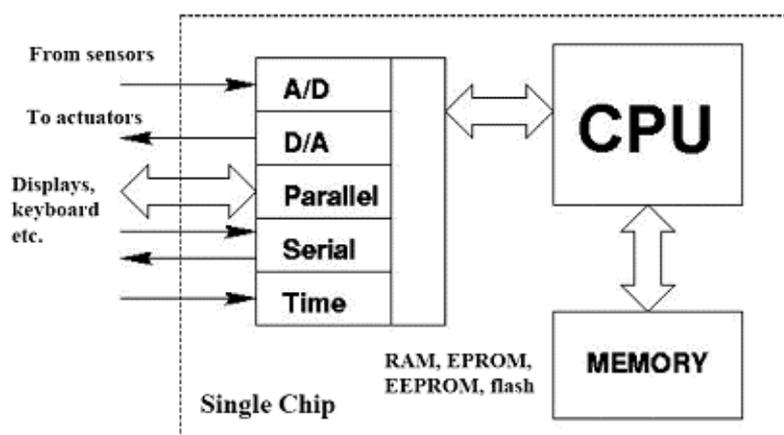


Fig 2.28. Diagrama típico de un microcontrolador y sus diferentes sub – unidades integradas

El diagrama muestra elementos como CPU, área RAM y ROM de memoria, puertos de entrada – salida, buses de datos, timers ó temporizadores, conversores ADC, entre los más destacados. Para interpretar el mismo diagrama de la figura 2.28, se dan dos ejemplos de diagramas internos de microcontroladores: el primero pertenece al Motorola MC68HC11¹³ en la figura 2.29, y el segundo al PIC16F877¹⁴ en la figura 2.30.

¹² Angulo Usategui, José M.: Microcontroladores PIC, diseño práctico de aplicaciones

¹³ <http://freeware. aus.sps.mot.com/hc11/home.html>

¹⁴ Angulo Usategui, José M.: Microcontroladores PIC, diseño práctico de aplicaciones

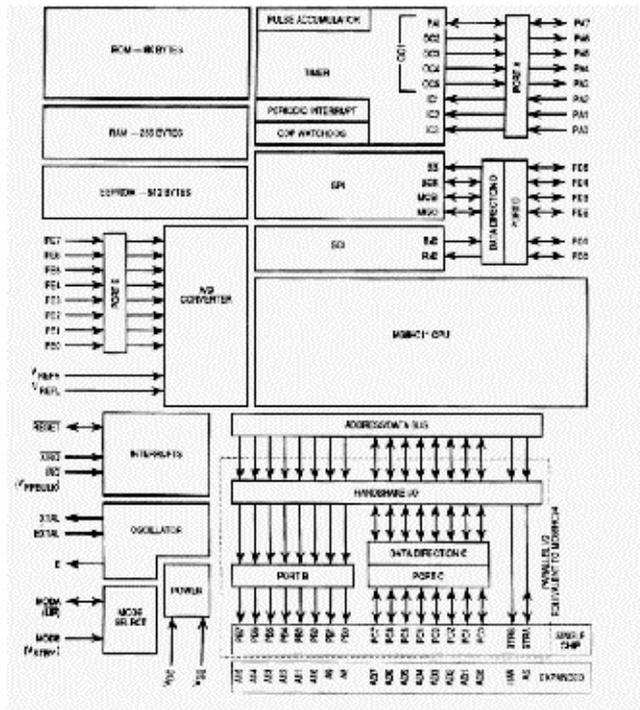


Fig. 2.29. Diagrama esquemático del microcontrolador Motorola MC68HC11

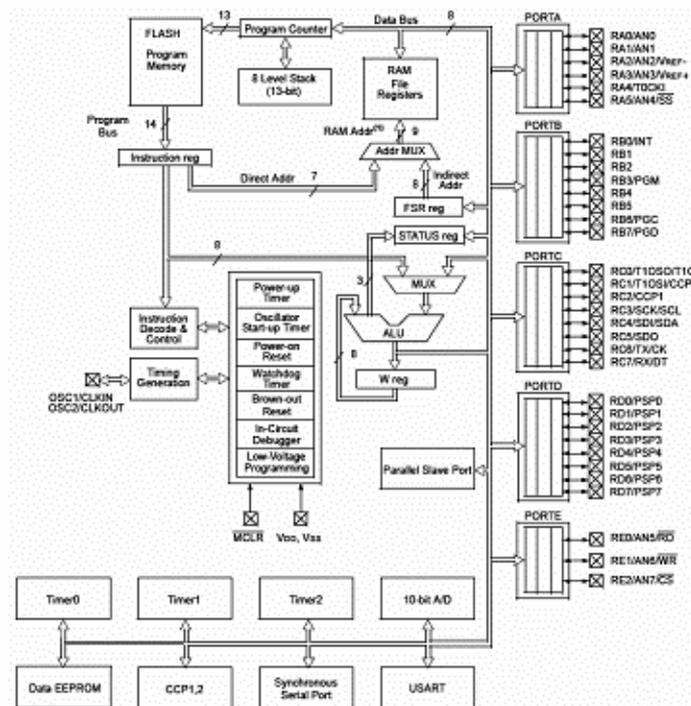


Fig. 2.30. Diagrama esquemático del microcontrolador Microchip PIC16F877

Estos diagramas dan una visión mas detallada en cuanto a los componentes internos; para citar a los que se destacan en ambos ejemplos, desmenuzando de los principales que se han mencionado tenemos:

- Etapa de alimentación de poder.
- Circuito para oscilador y generación de tiempo.
- Buses de direcciones, de datos y de control.
- Memoria de programas y de datos.
- Registros internos de propósito general ó específico.
- Pila de programa.
- Contador de programa.
- Unidad aritmético – lógica.
- Unidad central de proceso encasillada en la CPU con sus siglas características.

Se ratifica que las funcionalidades y componentes adicionales varían de un microcontrolador a otro, todos manejarán un lenguaje en particular que pretenda la facilidad para el usuario de programarlo según su necesidad.

2.9.2. Clasificación de los microcontroladores¹⁵.

Debido a la gran variedad de gamas, prestaciones y fabricantes de microcontroladores es difícil estimar una clasificación, sin embargo bajo parámetros técnicos se puede encasillarlos, estos criterios son:

- Por el tamaño de datos: Esta clasificación agrupa a los microcontroladores respecto al tamaño de datos en bits que puede procesar a la vez. Existen desde 4 bits, 8, 16, 32 hasta 64 bits.
- Por la arquitectura general: Aquí se diferencian en cómo se han dispuesto en el microcontrolador componentes tales como memoria, buses de datos, etc; la arquitectura

¹⁵ <http://informatik.rwth-aachen.de>

clásica utilizada en el inicio del desarrollo de los microcontroladores se denomina arquitectura Von Neumann. Actualmente, muchos microcontroladores utilizan esta arquitectura, pero poco a poco se impone un nuevo concepto: la arquitectura Harvard.

- Por la arquitectura del microprocesador: Este componente opera el microcontrolador a base de instrucciones para activar sus elementos de hardware, la clasificación separa a los microprocesadores con un juego de instrucciones complejo y hardware simple (CISC) de los que en cambio poseen un juego de instrucciones reducido y hardware complejo (RISC). Existe una tercera clasificación dentro de esta categoría, y se destaca por tener un juego de instrucciones reducido y a la vez específico (SISC). El diagrama de la figura 2.29 es un ejemplo de arquitectura CISC, y el de la figura 2.30 representa a la arquitectura RISC.

Dentro de la arquitectura de microcontroladores surge también un criterio para clasificarlos:

- De arquitectura abierta: Aparte de su estructura interna encapsulada, utilizan sus periféricos de entrada – salida para emplear dispositivos de memoria o circuitos integrados externos, ampliando su estructura de hardware.
- De arquitectura cerrada: Este modelo no admite variaciones ni ampliaciones, debe tan solo con su estructura interna soportar la aplicación a la que se destina.

2.9.3. Componentes básicos y avanzados.

Todo microcontrolador dispone de su estructura básica común al resto de microcontroladores, de allí cada uno posee sus componentes básicos y avanzados; dentro de los primeros se han mencionado CPU, memoria y periféricos, componentes que individualmente poseen una estructura intrínseca que se detalla a continuación.

- CPU: La unidad central de proceso ó CPU consiste de un microprocesador que integra varias funciones, como la de ejecutar un set de instrucciones para llevar a cabo determinadas tareas, acceder a memoria interna, externa ó periféricos para leer ó escribir datos en ellos.

- Memoria: Dispositivos de almacenamiento volátil ó no volátil que ayuda al microprocesador con el almacenamiento y ejecución de programas. Vienen en diferentes tipos, y varía la cantidad de memoria asignada según el fabricante y la gama de microcontrolador. Para los tipos de memoria se realiza una breve reseña:
 - RAM: Significa memoria de acceso aleatorio, memoria de propósito general para almacenar datos ó programas. Es volátil, significa que pierde el contenido que se le ha grabado cuando cesa la energía. Utilizada para almacenar datos dinámicos (es decir, que cambian durante la ejecución del programa). La memoria RAM es utilizada además en almacenamiento de datos y tareas de manejo de pila. También se utiliza en pila de registros. Para microcontroladores la cantidad de memoria RAM interna es usualmente pequeña, pero en la mayoría de aplicaciones alcanza, su rango típico es entre 25 bytes a 512 Kbytes.

 - ROM: Memoria de solo lectura, los datos que contiene fueron grabados durante su fabricación. Puede leerse su información cuantas veces se desee pero no se puede cambiar, casi siempre dicha información es el código del programa para el microcontrolador y valores de calibración por defecto. La cantidad de memoria ROM variará entre 512 bytes y 4Kbytes, aunque hay casos en los que sobrepasa los 128 Kbytes. La memoria ROM puede ser de tipo OTP, EPROM, EEPROM y flash EEPROM.

 - OTP: Memoria ROM de una sola programación, es la utilizada por los fabricantes para introducir el programa y los valores por defecto en el microcontrolador, sólo admite ser programada una vez, luego de ello no puede modificarse, tan solo leerse.

- EPROM: Memoria ROM de tipo programable y borrable, es similar a la memoria ROM OTP pero en la que el usuario puede programar y borrar varias veces. Almacena entonces datos de proceso y el programa diseñado por el usuario. Su programación es en forma eléctrica, y su borrado mediante exposición a rayos ultravioleta. Los chips que contienen memoria EPROM tienen una especie de “ventana” que deja ver el interior de la pastilla de material semiconductor, para que la radiación UV incidente borre el contenido de la memoria. La cantidad de memoria incluida en microcontroladores va desde 8Kbytes a 512Kbytes.

- EEPROM: Memoria ROM programable y borrable en forma eléctrica, es extremadamente útil y difiere de la anterior en que tanto programarla como borrarla se lo puede hacer de forma eléctrica, así es más fácil manejarla para el microprocesador. Se la utiliza para almacenar constantes de fábrica, y datos de configuración ingresados por el usuario, un aspecto vital es que tiene varios “ciclos” de borrado y grabado sin degradarse (entre 10000 y 1000000 veces), la información puede permanecer retenida por varios años sin necesidad de batería y toma pocos milisegundos para ser programada ó borrada. En microcontroladores no hay una gran cantidad de memoria de este tipo, algunos no sobrepasan los 512 bytes.

- Flash EEPROM: Otra versión de la memoria tipo EEPROM, posee las mismas cualidades pero con un funcionamiento más rápido (un byte puede programarse en cuestión de décimas de milisegundo), y el manejo de memoria se lo hace en bloques de varios bytes y no byte por byte. Para un microcontrolador se puede establecer varias cantidades de memoria flash, desde pocos bytes hasta varios Kbytes.

Periféricos¹⁶: Los dispositivos para manipular y comunicarse con el exterior son para el microcontrolador de gran utilidad, en múltiples propósitos y cada vez se diseñan de mayor capacidad. La mejor manera de empezar un proyecto con microcontrolador es comprender sus características principales y luego utilizar cada periférico según el uso que se le pretenda dar. La disposición de los periféricos es interna en la mayoría de casos, poseen

¹⁶ <http://www.best-microcontroller-projects.com/pic-microcontroller.html>

circuitos de interface con el microprocesador y pines de entrada – salida dados en cada fabricante y gama. Los más comunes e importantes son:

- Puertos de entrada – salida: El microcontrolador tiene este tipo de hardware especial para interactuar con el exterior. Este hardware se denomina puertos de entrada – salida, ó puertos I/O, utilizados frecuentemente para control de actuadores, displays, etc (el puerto se configura en este caso como salida). También sirven como entradas cuando se configuran para ello, con el propósito de captar señal de sensores, teclados, contactos, etc. Por esta explicación se da a entender que los puertos tienen propósito general, se pueden configurar como entradas ó salidas sobre la marcha, lo que da a un puerto la capacidad de múltiples operaciones. Los puertos agrupan varias líneas en los microcontroladores, pudiendo tener 4, 5, 8 ó hasta más líneas asignadas, desde la más significativa hasta la menos. Dependiendo de cada microcontrolador, puede tener varios puertos; parte de la selección de microcontroladores es escoger el que posea el número necesario de puertos y las líneas que se pretenda utilizar. Este rango de valores cambia de gama a gama, de fabricante a fabricante, pudiendo llegar a las 96 líneas de entrada – salida pero lo típico es disponer entre 12 y 32 líneas. Existen casos que hay puertos con todas ó parte de sus líneas asignadas permanentemente sólo como entradas ó sólo como salidas; en otros que las líneas de puerto no son de propósito general, estando reservadas para periféricos con diferentes funciones.
- Puertos de comunicación: Son un tipo de líneas de entrada – salida que posibilitan el intercambio de información entre microcontrolador y otros dispositivos, pueden ser PC, microcontrolador u otro circuito integrado que lo solicite. Actúan como entradas y salidas de datos binarios (transmisión y recepción). Puede manejar varias interfaces de comunicación.
- Temporizadores y contadores: Son líneas dedicadas que al ser activadas permiten al microcontrolador iniciar una interrupción interna ó subrutina cuando el tiempo establecido a dichos temporizadores culmine (llegue a cero) ó suceda lo mismo con la cuenta del contador. Dependen de la frecuencia del oscilador que gobierne el chip, existen varios temporizadores y contadores en un microcontrolador.

- Interrupciones: Existen líneas del microcontrolador para dicho propósito, al pulsar este tipo de interrupciones el microprocesador “interrumpe” la tarea que se encuentre realizando en ese momento para pasar a la tarea asignada a esa interrupción (denominada rutina de servicio), y una vez completada volver a la inicial. Las interrupciones internas difieren de las externas en que las primeras se generan al interior del microcontrolador.

Estos son los componentes básicos y comunes a casi todos los microcontroladores, resta detallar los de tipo avanzado que con mayor frecuencia se encuentran:

- Módulo DAC y módulo ADC: Siglas de conversor digital a analógico y conversor analógico a digital respectivamente, hace posible manipular varios tipos de señales analógicas para su procesamiento digital y posterior reconversión a formato analógico. Dependiendo de la capacidad puede variar su resolución.
- Comparadores: Lleva una utilidad frecuentemente utilizada en instrumentación al encapsulado del microcontrolador. Sirve por lo general para lazos de control.
- Módulos de captura – comparación – pwm: Algunos microcontroladores disponen de este tipo de periférico, el cual puede comportarse como un circuito generador de onda modulada en ancho de pulso.
- Interface USB: Ya viene incluida esta función recientemente incorporada a ciertos micros de gama media y alta, lo cual facilita enormemente la comunicación especialmente con la PC.

2.9.4. Lenguajes en microcontroladores.

Al momento de tratar con un microcontrolador, aparte de la idea que se tenga para cualquier aplicación, el lenguaje que se ha estandarizado para la programación posee una mayoría de similitudes en los diversos chips. Sin embargo debe diferenciarse lo que puede “leer” el microcontrolador y lo que el programador estructura en nuestro lenguaje natural alfanumérico. Es precisa una explicación puntual de estos lenguajes:

- El lenguaje que va a entender cualquier sistema digital microprocesado es el binario, corresponde a las instrucciones dadas al microcontrolador en unos y ceros lógicos dispuestos de tal forma que el microprocesador y ciertos dispositivos que lo acompañan trabajarán “mecánicamente” con dicha secuencia; se denomina lenguaje ó código de máquina. Lo cierto es que si bien el sistema sólo sirve para ejecutar “ciegamente” las tareas para lo que se ha programado, mientras la programación tenga lógica y sea correcta, el sistema hace la ejecución con una relativa rapidez que no hace notar el hecho anterior.
- Al programador le corresponderá también un lenguaje que pueda digerir y analizar, a fin de agilizar y hacer eficiente la programación; este se llama lenguaje ensamblador, que recurre a caracteres alfanuméricos denominados nemónicos que simbolizan las instrucciones (equivalente alfanumérico de las instrucciones en lenguaje máquina). Son de nomenclatura corta, casi siempre las iniciales de la operación ó tarea, acompañado de sus argumentos u operandos.

Como es obvio, debe existir una interpretación ó traducción entre ambos lenguajes, de aquello se encarga el programa ensamblador, toma los caracteres alfanuméricos estandarizados escritos por el programador y línea por línea transforma a lenguaje máquina, para el lenguaje nemónico existe una clase de archivo con el que trabaja casi todo programa ensamblador y es el archivo fuente del programa, con extensión `.asm`¹⁷; al momento de traducir este último a código máquina arrojará otro archivo pero de extensión

¹⁷ Microchip MPASM Assembler User's Guide

.hex¹⁸, que contendrá puramente unos y ceros, los que sirven al micro cuando se lo programe y ponga en funcionamiento.

▪ **Set de instrucciones**

Los caracteres alfanuméricos conforman el lenguaje ensamblador, sin embargo lo principal de aquellas son las operaciones que simbolizan; para la gran mayoría de microcontroladores los tipos de instrucciones más frecuentes y útiles son:

- Instrucciones aritméticas
- Instrucciones lógicas
- Instrucciones booleanas
- Instrucciones de transferencia de datos
- Instrucciones de carga y almacenamiento
- Instrucciones de salto
- Instrucciones relacionadas con la pila
- Instrucciones para ejecución de subrutinas ó por interrupciones
- Instrucciones especiales

Cada familia y fabricante de microcontroladores aplica para un set de instrucciones en particular, difieren en ciertos nemónicos pero en definitiva no salen de contexto en las operaciones.

2.10. INTRODUCCIÓN A SERVOMECANISMOS

2.10.1. Definición de un servomecanismo básico

La razón básica para utilizar un servomecanismo en comparación a sistemas de control a lazo abierto incluye la necesidad de mejorar los tiempos de respuesta transitoria, error en estado estable y sensibilidad a cambios en los parámetros de carga. Un servomecanismo

¹⁸ Microchip MPASM Assembler User's Guide

no es tan fácil de definir ni se explica por si solo, porque no aplica a ningún dispositivo en particular. Es un término que aplica a una función ó tarea determinada. La función ó tarea de un servo se puede describir como un actuador mecánico ó un conjunto de elementos eléctricos y mecánicos que posee suficientes elementos de control para que pueda regular sus parámetros respecto a su funcionamiento mecánico (variable física), tal como su posición, velocidad, torque, etc.¹⁹.

Será un sistema a lazo cerrado para el control de potencia hacia el elemento activo ó móvil. Una señal de comando analógica ó digital sirve para aquello, desde el panel de usuario va hacia el dispositivo interno de control del servo, el cual se encarga de que el “hardware” del servo ejecute la ó las tareas señaladas. Los servomecanismos están difundidos en varias aplicaciones como:

- Robótica y domótica
- Electrónica industrial y doméstica
- Hidráulica y neumática
- Industria automotriz

Debido a la variedad de usos dentro de los sistemas de control, tan solo se puede generalizar el concepto de servomecanismo mediante una secuencia en diagrama esquemático, mostrado en la figura 2.30.

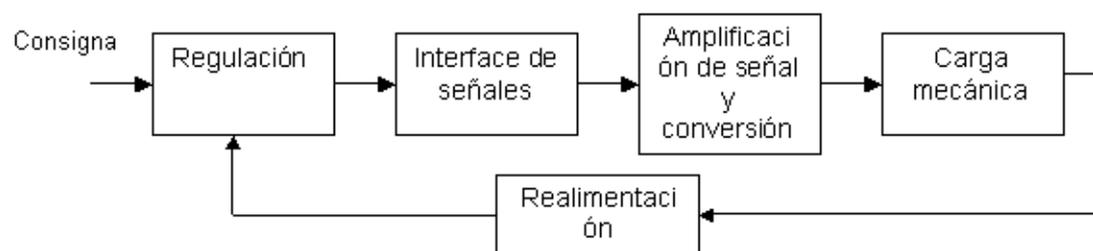


Fig. 2.30. Concepto de servomecanismo

¹⁹ <http://www.baldor.com/pdf/manuals/1205-394.pdf>

2.10.2. Componentes de un servomecanismo

El sistema de un servomecanismo posee la estructura semejante a la de un clásico sistema de control realimentado, internamente puede abarcar en varios términos sus componentes principales:

- Punto de consigna y detección de error: Engloba al comparador como se lo conoce en sistemas de control.
- Controlador: Ejerce la acción de control sobre el sistema.
- Amplificador de señal: Se trata de un dispositivo que recibe la débil señal del controlador y la “eleva” a niveles con los que pueda manejar la siguiente etapa.
- Elemento activo ó móvil: Le brinda movilidad al servo al aplicársele una energía ó potencial.
- Conversor de energía: Transforma la energía del elemento activo en movimiento mecánico (torsión). El conjunto elemento activo y conversor es conocido en control como planta.
- Captador de señal: Elemento que tomando la señal de salida y acondicionándola, realimenta al sistema o cierra el lazo de control.

2.10.3. El servomotor.

El servomecanismo denominado servomotor ó también conocido sólo como servo en Electrónica de control es un motor eléctrico acoplado a un dispositivo de control realimentado. Con mayor precisión, es una máquina electromecánica con sensores agregados que permite conocer su velocidad o posición de eje y por medio del elemento de control comandarlo. Se lo puede controlar en un amplio rango de estas variables. La estructura interna del servomotor tiene los siguientes bloques:

- Motor eléctrico de C.C. ó C.A.
- Caja de engranajes reductora
- Circuito de control realimentado

Ciertas nomenclaturas de servomotores catalogan a los bloques constitutivos en tres: motor más caja de engranajes reductores, circuito de control y sensores, lo cual no dista mucho de los bloques definidos anteriormente. El motor inmerso en un servomotor conserva la fuerza, velocidad y baja inercia para aplicaciones de fuerza mejor que siendo operado en circuito abierto.

2.11. VARIADORES DE FRECUENCIA²⁰.

Para entender el significado de este tipo de dispositivo, la función básica de un manejador variable de potencia como se lo conoce también es controlar el flujo de energía desde los terminales principales de alimentación hacia el proceso. Al agregar un manejador de potencia a un sistema accionado por motor eléctrico ofrece enorme ahorro de energía sobre todo cuando está sujeto a cambios en la carga. Los manejadores de frecuencia variable se conocen también como manejadores ajustables ó variables de velocidad, drivers ó inversores. La velocidad, torque, aceleración, sentido de giro y deceleración a la que se desee que opere un motor puede ser variada al cambiar la frecuencia del voltaje que se le suministre, esto permite un control continuo en el proceso. Muchos procesos industriales como bandas transportadoras deben operar a diferentes velocidades para diferentes productos. Las condiciones de proceso demandan ajuste de flujo para una bomba ó ventilador, utilizando los variadores requiere menos energía comparado a otras técnicas. Las velocidades pueden ser pre – establecidas y por esto se cambia la velocidad de manera “suave”, sin transiciones abruptas, lo que implica un mejor acople motor – carga.

La energía es suministrada del variador al motor, del eje del motor al proceso. Dos variables físicas describen el estado del eje: torque y velocidad; el variador al controlar estas variables va a dosificar la energía al motor. En la práctica una de las dos es controlada, y se tiene entonces “control de torque” ó “control de velocidad”. Cuando el

²⁰ http://es.wikipedia.org/wiki/Variador_de_frecuencia

variador trabaja en el primer modo, la velocidad es determinada por la carga, en cambio para el modo control de velocidad, el torque lo establece la carga. Los siguientes son beneficios en control de procesos que puede proveer un variador de frecuencia:

- Reducido costo de mantenimiento
- Operación suave
- Control de torque y aceleración
- Diferentes velocidades para cada necesidad de proceso
- Mejor compensación para variables de proceso cambiantes.
- Ajuste de ritmo de producción

2.11.1. Principio de variación de velocidad en motores a.c. mediante variación de frecuencia.

Los variadores de velocidad típicamente consisten de tres elementos principales, mostrados en diagrama de bloque figura 2.31.

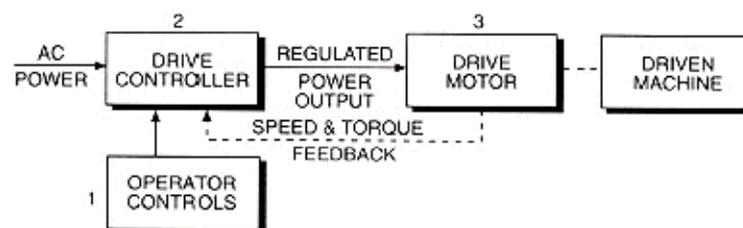


Fig 2.31. Diagrama funcional de bloques en un sistema variador de velocidad

Con respecto a los bloques individuales, se hace una analogía a cada función²¹ como se lo explica a continuación:

- Operator controls (control de operador): Es el jefe del sistema, permite al operador arrancar y parar el variador presionando botones ó interruptores, y establece la velocidad del motor sea a base de potenciómetro u otro control. Este control y el

²¹ http://www.joliettech.com/adjustable_speed_drives_application_information.htm

manejador pueden venir por separado ó integrados. Un dispositivo de control se muestra en la figura 2.32.



Fig 2.32. Control de operador

- Drive controller (Controlador del manejador): Trabaja como cerebro del sistema, convierte el voltaje y frecuencia fijos de la red en un suministro ajustable para la variación de velocidad deseada. Conversión sustentada principalmente en dispositivos semiconductores de potencia y una etapa generadora de pulsos. El controlador incluye circuitos de sensado en pos de ejercer acciones de control frente a variaciones de voltaje, transitorios, sobrecargas ó cambios en la carga del motor. Un módulo de este tipo se muestra en la figura 2.33.



Fig. 2.33. Driver ó manejador de potencia

- Drive motor (Motor eléctrico): Se convierte en el músculo de todo el sistema, al transformar la energía en forma de voltaje y frecuencia variable en movimiento mecánico. Las revoluciones por minuto del motor varían en proporción a la variación de frecuencia aplicada por el bloque anterior. El eje del motor es normalmente acoplado a un reductor mecánico u otro sistema de transmisión de energía mecánica para brindar al proceso los requisitos de velocidad y torque

operativos. El motor, en este caso de inducción para a.c. se muestra en la figura 2.34.

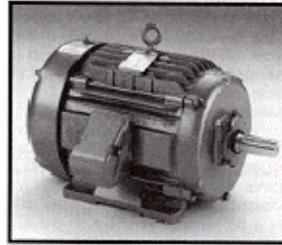


Fig. 2.34. Motor a.c. de inducción

El motor a su vez acciona mediante los sistemas mecánicos a los dispositivos de proceso (driven machine), como se representa en la figura 2.35.

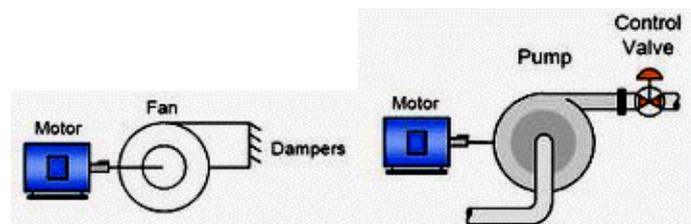


Fig 2.35. Diversos procesos acoplados al motor controlado por variador de velocidad

Un variador de frecuencia convierte la energía de la red (60Hz) por ejemplo, a una nueva frecuencia en dos etapas: rectificación – filtrado e inversión, se muestra en la figura 2.36. El proceso de conversión²² incorpora las siguientes funciones:

- Etapa de rectificación – filtrado: Un circuito rectificador de onda completa de estado sólido convierte la tensión monofásica ó polifásica en tensión continua fija ó variable; que viene acompañada de una sub – etapa de filtrado con el propósito de tomar la tensión alterna rectificadas y “suavizar” su forma de onda, es decir los elementos activos del filtro (inductancias y capacitancias) trabajan juntas para eliminar en lo posible las componentes alternas de lo que se desea obtener en esta etapa, una tensión continua

²² Rashid, Muhammad: Electrónica de potencia
<http://www.oee.nrcan.gc.ca/industrial/equipment/vfd/vfd.cfm?attr=26>

casi perfecta. Para sistemas de alta tensión esta etapa puede incorporar a la entrada transformadores.

- Etapa de inversión: Se lleva a cabo la conmutación de la tensión continua a base de interruptores tipo semiconductores (transistores de potencia, relés de estado sólido ó tiristores), se encargan de “reconstruir” la onda senoidal que caracteriza la tensión alterna que ingresó a la etapa anterior pero a la tensión y frecuencia deseada, interruptores gobernados por un circuito de control que tiene como principio la activación secuencial de dichos interruptores con modulación de ancho de pulso. La forma de onda será muy similar a la original, sin embargo acarrea un cierto nivel de distorsión, el cual hay que saber manejar en el diseño de la etapa de filtrado.
- Circuito de control: Recibe la realimentación del sistema, información de sensores que le permite ajustar el voltaje y frecuencia de salida. Usualmente el voltaje de salida es regulado para producir una tasa constante entre voltaje y frecuencia (V/Hz ó V/F).

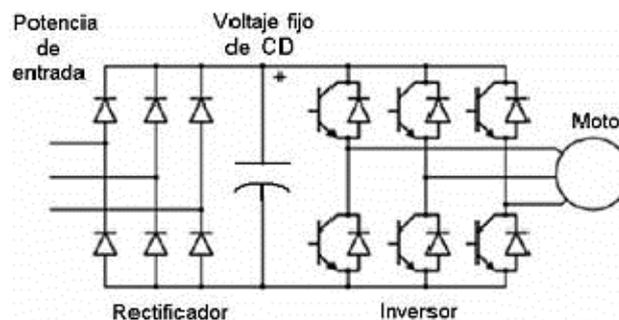


Fig 2.36. Etapas de rectificación – filtrado e inversión de un variador de frecuencia

Cuando se cambia la frecuencia de la tensión suministrada al motor, esta tasa (V/F) es generalmente mantenida a un valor constante entre las frecuencias máxima y mínimas de operación. Una representación de este parámetro se ilustra en la figura 2.37.

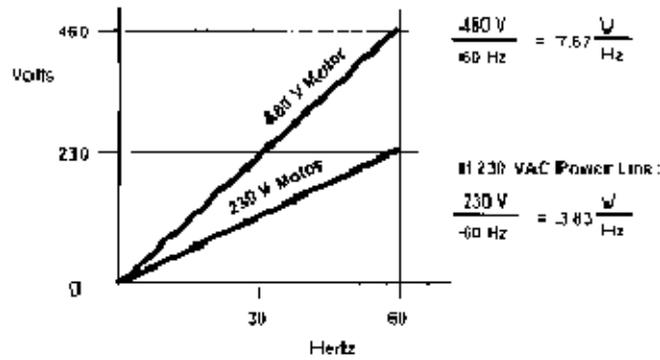


Fig 2.37. Curva de tasa voltaje – frecuencia y ejemplo para tensiones distintas

La influencia sobre el torque de esta tasa se muestra en la figura 2.38.

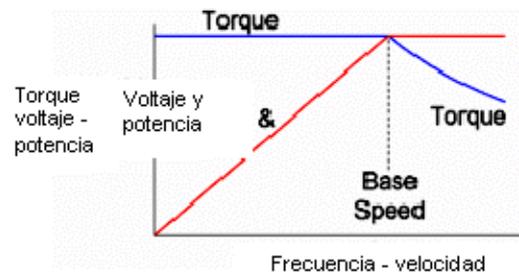


Fig 2.38. Curva V/F y su incidencia en el torque

Un variador de frecuencia controla dos elementos de un motor de inducción, velocidad y torque. Para entender cómo lo logra, es necesaria una breve explicación acerca de los motores mencionados; tiene dos partes principales: el rotor y el estator que funcionan a través de interacción electromagnética. Un motor tiene polos en su estator, dispuestos en pares, bobinas devanadas con cierto patrón en una estructura de hierro para proveer de un campo magnético norte – sur. La estructura física del motor de inducción se muestra en la figura 2.39 y el principio físico representado en un diagrama se muestra en la figura 2.40.

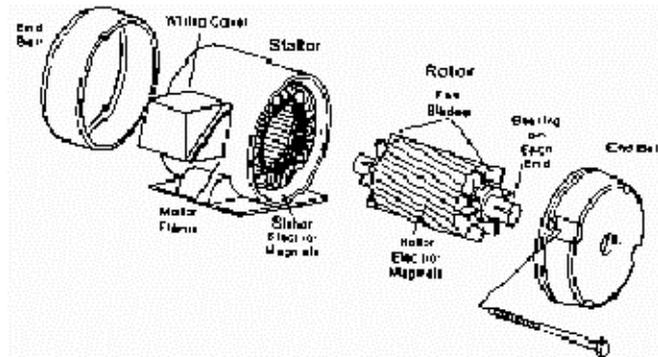


Fig 2.39. Componentes básicos del motor de inducción

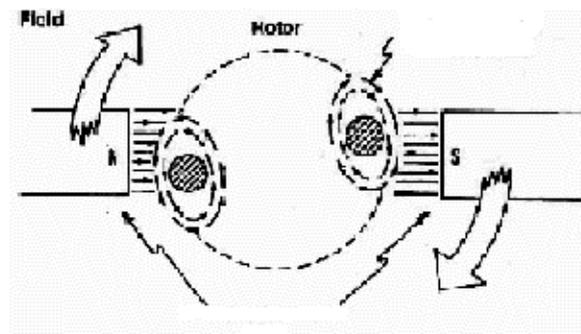


Fig 2.40. Principio de operación del motor de inducción

Con un par de polos aislados en un motor, el rotor (eje) girará a una velocidad específica: la velocidad base. La fórmula²³ que determina dicha velocidad se denota como:

$$S = \frac{120 * f}{p} \quad (2.30)$$

donde “S” es la velocidad en R.P.M. del eje motor, “f” es la frecuencia de la tensión que alimenta al motor y “p” es el número de polos. Esta fórmula debe sin embargo incluir un efecto llamado “deslizamiento”, que es la diferencia entre la velocidad del rotor y la del campo magnético giratorio en el estator. Cuando un campo magnético es cortado por las barras conductoras del rotor, se induce un campo en el mismo. Este campo magnético inducido en el rotor tratará de “alcanzar” en velocidad al campo magnético del estator, sin

²³ Kosov, Irving: Máquinas eléctricas

embargo, nunca lo logra (dicha diferencia de velocidad es el deslizamiento). Entonces la fórmula se modifica de manera que:

$$S = \frac{120 * f}{p} - \text{deslizamiento} \quad (2.31)$$

Entonces es conveniente ajustar la velocidad de un motor al cambiar su frecuencia por eficiencia de costo y precisión, ya que físicamente es dificultoso y no muy económico modificar el número de polos.

- **Relación entre voltaje y frecuencia²⁴.**

El variador de frecuencia establece la velocidad de un motor de inducción ó de a.c. en general para un amplio rango, desde cero pasando por la velocidad base (usualmente a 60 Hz) y valores por sobre la base (entre 90 a 120 Hz). Existe la ya mencionada relación voltaje a frecuencia, (V/F) que se calcula tan solo como dividir el valor nominal RMS del voltaje de alimentación para la frecuencia de dicha tensión. Cuando la frecuencia aplicada al motor es reducida, el voltaje también debe ser reducido para limitar la corriente de motor, esto se explica ya que la reactancia inductiva del motor se incrementa al subir la frecuencia, y cuando esta última se acerca a cero deja de oponerse al paso de corriente. Para los variadores de frecuencia esta relación se mantiene constante para el rango entre 0 y 60 Hertz y en cierto tramo por sobre la frecuencia base ya que con rangos elevados de frecuencia ó voltaje se debilitará el campo magnético, no obstante el control de este dispositivo ajustará esta relación según las demandas del proceso. La etapa de control también procura aumentar ó disminuir simultáneamente el voltaje y frecuencia, así es como mantiene la relación constante

²⁴ <http://www.kilowatt.com/Archive/VFDarticle.pdf>

- **Características de velocidad versus torque**

Una muestra del comportamiento potencia – torque versus frecuencia puede explicarse de mejor manera en la figura 2.41.

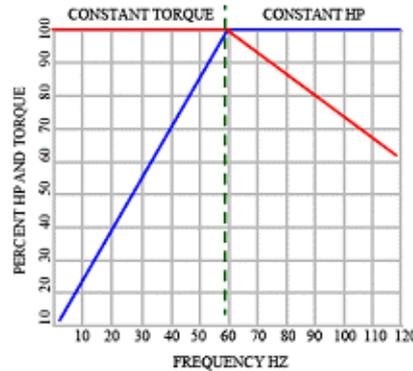


Fig 2.41. Características de torque – velocidad versus frecuencia

En azul se representa la curva de potencia en H.P., en línea roja el torque, y en verde la frecuencia nominal del motor. En el área donde el torque se mantiene constante, el variador suministra el voltaje nominal del motor y entonces desarrollará su máxima potencia a su frecuencia base. En el área donde la potencia se mantiene constante, el variador alimenta al motor con su voltaje nominal en una rampa de frecuencia que va desde la frecuencia base (60 Hz en este caso) hasta 120 Hz (ó su valor máximo). El torque se reduce mientras se aumenta la frecuencia.

2.11.2. Variadores de frecuencia para manejo de motores de inducción a.c.

Inicialmente, los motores de corriente continua (c.d.) se utilizaban en conjunto a variadores de velocidad con mayor frecuencia porque pueden alcanzar mejor desempeño en velocidad y torque sin la necesidad de circuitos electrónicos manejadores complicados. Sin embargo, la evolución de los variadores de velocidad para a.c. se ha logrado en parte por el propósito de emular aquella funcionalidad de los motores de c.d. en los robustos, económicos y de bajo mantenimiento motores de a.c. Los variadores de frecuencia utilizados para el control de velocidad en motores de inducción a.c. poseen la capacidad de controlar la velocidad y

el torque hacia el motor, según lo requiera el proceso. Para analizar en breves pero concisos rasgos dicho dispositivo se subdivide en tres maneras de ejercer este control:

- **Manejador de a.c. para control de frecuencia vía PWM:** Se lo conoce también como control escalar. Sus características principales tiene al voltaje y a la frecuencia como sus variables controladas, utiliza un modulador para simular la señal de a.c. sinusoidal variable, provee de flujo al motor con una relación V/F constante, opera a lazo abierto, la carga determina el torque. El control se lo ejerce mediante los parámetros externos del motor como la variable controlada, el voltaje nominal y la frecuencia. El inversor controla al motor con una señal dada por la modulación de ancho de pulsos que genera; no posee realimentación de velocidad por eso se dice que es a lazo abierto. Acarrea desventajas como la no utilización de orientación de campo, ignora el estado del motor, el torque no es controlado; este tipo de control sencillo y económico es recomendable para aplicaciones que no demanden altos niveles de precisión, como bombas ó ventiladores. La onda PWM que comanda a este dispositivo y los niveles resultantes de voltaje se muestran en la figura 2.42. Todo depende del ciclo de trabajo del circuito PWM (denominado “duty cycle” en muchos dispositivos). Cuando los pulsos son angostos, se obtendrá un menor voltaje medio; en cambio a pulsos más anchos existirá mayor voltaje. A pesar de la forma de los pulsos, en el motor la forma de onda de corriente será muy aproximada a la senoidal. Una representación esquemática de este tipo de manejador se muestra en la figura 2.43.

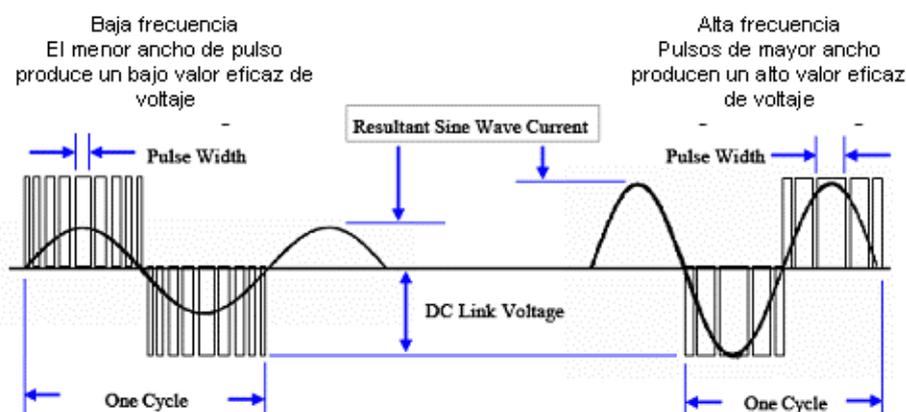


Fig 2.42. Modulación en ancho de pulso del variador y voltajes medios resultantes

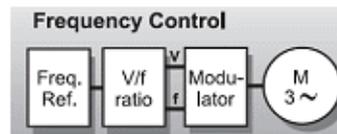


Fig 2.43. Diagrama de bloques del manejador voltaje – frecuencia

- Manejador de a.c. para control vectorial de flujo vía PWM: Es un control de orientación de campo lo que significa conocer la posición espacial angular del flujo de campo dentro del motor. Es un sistema a lazo cerrado, realimenta al sistema con la velocidad de rotor y la posición angular relativa al campo del estator; además el manejador utiliza el modelo matemático del motor para procesar los datos recibidos. Como variables, además del voltaje y la frecuencia este manejador incorpora el control de corriente al motor, alimentando al mismo con la misma modulación PWM, controlando indirectamente el torque para brindar mejor respuesta. Existirá elevada precisión en el manejo de velocidad y torque, elevado torque a bajas frecuencias, rendimiento cercano al del motor c.d. Pero este sistema es más costoso, complejo y necesita realimentación. Una representación en bloques de este manejador se muestra en la figura 2.44.

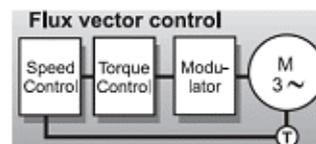


Fig 2.44. Diagrama de bloques del control vectorial

- Manejador de a.c. con control directo de torque: Es una tecnología reciente desarrollada por la empresa ABB²⁵, identificada con las siglas DTC (Direct Torque Control), con la cual ejerce la orientación de campo sin dispositivos de realimentación utilizando un complejo algoritmo basado en el modelo matemático del motor, así el DTC calcula el torque y lo aplica directamente sin necesidad de modulación PWM. Las variables de motor a controlar son el flujo magnetizante y torque motor. Los cálculos se realizan de manera muy rápida, resultando en una respuesta de torque típica

²⁵ <http://www.abb-drives.com/StdDrives/RestrictedPages/Marketing/Documentation/Files/Products/DTCTechGuide.pdf>

10 veces más rápida que con cualquier manejador de a.c. ó de d.c., la precisión en velocidad es hasta 8 veces mayor que un manejador a lazo abierto, acercándose a un manejador de d.c. que utilice realimentación. Un diagrama esquemático se muestra en la figura 2.45.

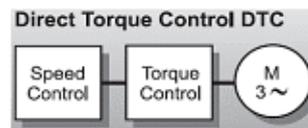


Fig 2.45. Control directo de torque (DTC)

2.12. SENSORES APLICADOS AL PROYECTO.

Para efectuar el control de variables en un proceso debemos obtener información de las mismas, esto se logra con la medición. Un sensor es el dispositivo que desempeña la labor de medición de variables físicas y convertir la energía que capta de ellas, modificada o no, en una señal que el controlador pueda procesar (generalmente convertida en energía eléctrica). La variable entonces es representada para todo valor en la forma requerida por el resto de elementos del control de proceso. El sensor a menudo se lo denomina también como transductor²⁶, la palabra sensor es preferida para el dispositivo inicial de medición, sin embargo el transductor su función principal es la de convertir señal de un tipo a otro. Todos los sensores son transductores, pero no todos los transductores son sensores.

2.12.1. Sensores de posición

Este es un sensor que entrega una señal analógica de salida tipo B (tren de pulsos), en el caso de los sensores de posición toman la ubicación instantánea del objeto móvil a ser controlado y que esté dentro de un sistema con límites conocidos de movimiento, utiliza varios principios de captación de señal como el eléctrico, electromagnético, inductivo, óptico y la transforma en un tipo determinado de señal eléctrica, así puede ser aceptada por dispositivos de control. La medición de posición se puede encasillar en dos categorías²⁷:

²⁶ Creus, Antonio: Instrumentación industrial

²⁷ <http://www.baldor.com/pdf/manuals/1205-394.pdf>

- Posición lineal: Por el hecho de que la distancia más corta entre dos puntos es la línea recta, los sensores que miden esta magnitud se especializan en longitud lineal, entendida en instrumentación como distancia ó desplazamiento lineal. La distancia aplica para grandes longitudes del rango de ciento de metros a kilómetros, y en desplazamiento se refiere desde pocos milímetros a metros.
- Posición angular: De amplia aplicación en varios campos de la instrumentación, ya que muchos procesos incluyen el uso de motores ó de cualquier dispositivo que genere movimiento rotacional. Su unidad de medida son grados sexagesimales ó radianes, son sensores económicos y fáciles de utilizar. Esta categoría es la que se involucra mayormente en el proyecto.

Ejemplos de sensores de posición lineal se tienen potenciómetros, de inductancia y capacitancia variable, LVDT's, galgas extensiométricas, transductores piezoeléctricos, de proximidad, ópticos, etc. En el caso de posición angular los más conocidos son: potenciómetros, encoders, pick – up, resolvers, sincros, etc. El sensor denominado encoder ó traducido como codificador de pulsos es uno de los que se obtiene excelentes resultados y mejor se adapta a todo tipo de aplicaciones.

- **Codificador de posición óptico.**

Proporcionan información de posición de un eje giratorio al cual estén acoplados, implican un bajo costo, reducido tamaño, y una gran variedad de modelos. Su disposición física comprende un sistema de detección óptico a partir de un conjunto emisor – detector óptico, que se encarga de formar la onda tren de pulsos de salida; el origen de esta onda pulsante es una plantilla circular insertada en el eje que genere la rotación y que disponga un patrón de ranuras por las que alternativamente impida ó permita el paso del haz de luz entre emisor y detector mientras gira. La velocidad que se obtendrá se basa en la fórmula²⁸:

$$S_{(RPM)} = \frac{60 * f}{\#Ranuras} \quad (2.32)$$

²⁸ <http://www.patchn.com/encoder-basics.html>

donde S es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto, f es la frecuencia del tren de pulsos y se divide para el número de ranuras de la plantilla circular ó disco ranurado. El encoder real incluye el conjunto emisor – detector, consiste de un optotransistor acoplado a un diodo LED, un disco ranurado que se acopla al eje del motor y se ubica de tal manera que las ranuras al girar el disco obstruyen la línea de vista entre el LED y el optotransistor. El encapsulado de emisor – detector se muestra en la figura 2.46.

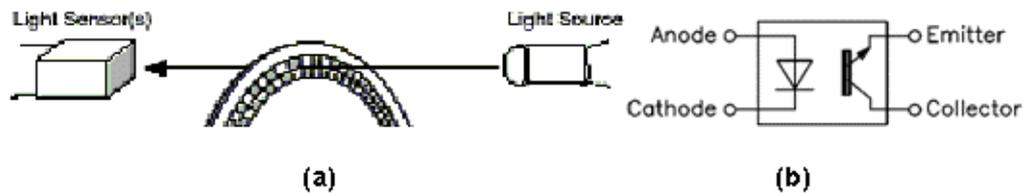


Fig 2.46. (a) Esquema de emisor – detector óptico; (b) Simbología del conjunto

El diodo LED emite luz visible ó en el espectro infrarrojo cuando se lo alimenta con voltaje de polarización. El transistor también es polarizado para que al receptor la luz del LED actúe como interruptor. El optotransistor se encenderá cuando la luz incida en su superficie sensible, y esto obliga al voltaje de salida a tomar un valor cercano a cero, y cuando el paso de luz se obstruye debido al paso entre ranuras del disco el optotransistor se comporta como un circuito abierto, llevando el voltaje de salida al mismo nivel del voltaje de polarización. Así se genera una transición de alto a bajo interpretada para la circuitería externa como un pulso. El disco ranurado gira interponiendo sus ranuras en la línea de vista del emisor – detector, y se desplazan en forma repetitiva para dar la característica continua a los pulsos generados. El tiempo de apagado del optotransistor es del orden de $50 \mu s$, y el tiempo de encendido es aún más corto (del orden de los nanosegundos). Por esta razón el número de ranuras debe ser seleccionado en un límite dentro del cual el dispositivo óptico tenga respuesta (puede darse una transición tan rápida entre ranuras que sea menor en tiempo que el tiempo de apagado del optotransistor, lo cual incide en errores de conteo de pulsos). Un patrón estándar de disco ranurado se muestra en la figura 2.47.

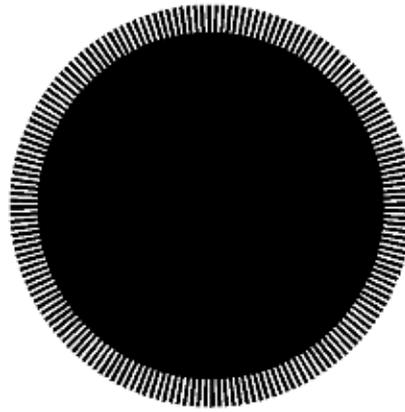


Fig 2.47. Disposición de ranuras en un disco de encoder

El circuito acondicionador de señal polariza a emisor y detector con el voltaje de la fuente (usualmente 5Vdc) con esto la señal de salida fluctúa entre +5V cuando el optotransistor está bloqueado y cerca de 0.5 V cuando incide la luz del emisor. Estos niveles de voltaje son compatibles con la circuitería digital, sin embargo debido a fuentes externas de ruido y la atenuación si se utiliza este dispositivo a grandes distancias, la salida debe ser filtrada (pasabajos). La frecuencia de corte es determinada por el número de ranuras en el disco y cuan rápido va a girar. Está dado por la ecuación²⁹

$$f_c = \frac{s_w n}{60} \quad (2.33)$$

donde s_w es la velocidad máxima del disco en R.P.M., y n es el número de ranuras. La red RC escogerá valores dados por

$$RC = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (2.34)$$

Por ejemplo, si la velocidad máxima del disco es 10 rpm y posee 12 ranuras, entonces $RC = 0.08$, asumiendo por ejemplo un valor de $C = 10 \mu\text{F}$, la resistencia será $R = 8\text{k}\Omega$. Una disposición típica del circuito acondicionador se muestra en la figura 2.48

²⁹ Pallas, Ramón: Sensores y acondicionadores de señal

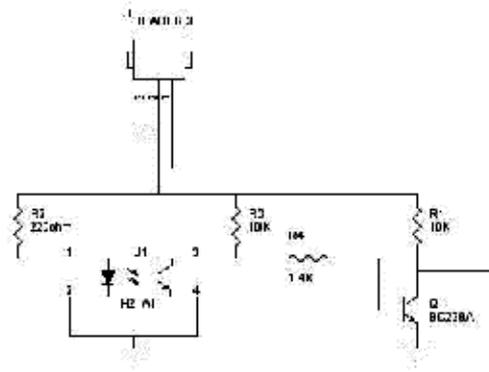


Fig 2.48. Circuito generador de pulsos eléctricos del encoder

En el circuito anterior, la salida de pulsos no se obtendrán exactamente los +5V en obstrucción, y debe ser corregido. Para lograrlo se utiliza un circuito “buffer”, que toma la señal no normalizada y proporciona +5V exactos para nivel alto y 0V para nivel bajo. Esta cuantización garantiza que el circuito digital externo pueda aceptar la señal generada sin indeterminaciones. Un circuito de buffer para entrada de microcontrolador PIC se muestra en la figura 2.49

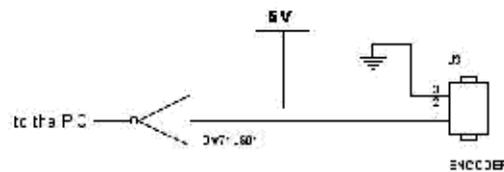


Fig 2.49. Buffer de entrada para el microcontrolador PIC para encoder

Un encoder y su principio de operación se muestran en la figura 2.50.

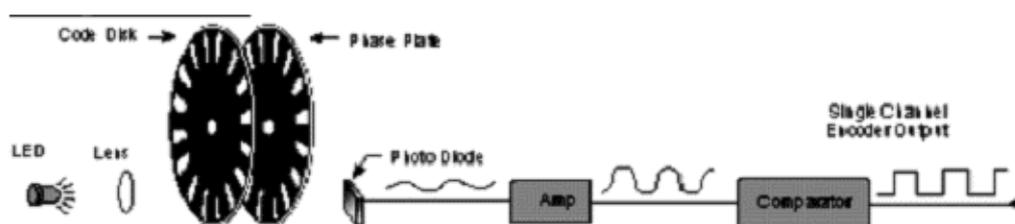


Fig 2.50. Encoder óptico

- **Codificadores absoluto e incremental³⁰**.

El funcionamiento del encoder es aparentemente sencillo, pero surge un obstáculo cuando el circuito requiere determinado tipo de señal para interpretar la posición ó velocidad. Si se trata de distinguir a los encoders ópticos de manera particular, cabe señalar que debido a la señal de salida que entreguen serán de tipo absoluto ó incremental:

- Encoder absoluto: Poseen la estructura de conjunto emisor – receptor junto al disco ranurado y al hacer girar este último el dispositivo giratorio del encoder tiene una disposición de ranuras tal que el conjunto óptico arrojará una señal digital distinta para cada posición (tiene una correspondencia unívoca, a cada posición, una salida codificada). Se puede decir que el encoder se comportará como un generador de dígitos binarios en código sea BCD ó Gray al hacer girar el disco.
- Encoder incremental ó relativo: Su señal de salida genera puramente un tren de pulsos, muchas veces acompañado a una referencia de posición inicial. El dispositivo óptico es afectado por el giro de un disco con un número dado de ranuras a intervalos iguales; esto hace que se interprete a cada pulso “incrementa” una posición. Para propósito de conocer el sentido de giro, algunos incluyen un segundo disco ranurado que ofrece un “desfase” con el disco original.

A la hora de seleccionar un encoder es imprescindible tomar en cuenta los parámetros fundamentales de los mismos como medida absoluta ó incremental, resolución (pulsos ó bits por revolución), capacidad multivuelta, voltaje de operación, resistencia física, tamaño, costo, etc. El sensor se encarga tan solo de emanar su señal sea binaria ó digital tren de pulsos, ambas se acomodan bien a ser receptadas y procesadas por circuitos electrónicos digitales externos compatibles por ejemplo con lógica TTL en circuitos integrados y microcontroladores. Ejemplos de encoder absoluto e incremental precisando las diferencias en el ranurado de los discos se muestran en la figura 2.51.

³⁰ http://www.cpr2valladolid.com/tecno/cyr_01/robotica/sistema/sensores.htm

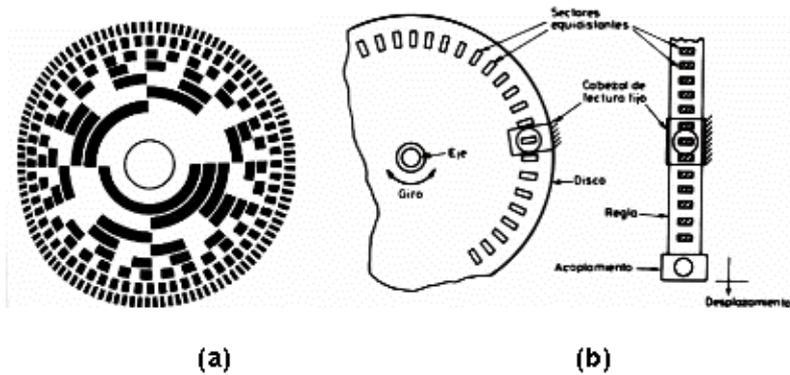


Fig 2.51. Diferencia entre disco de encoder (a) absoluto y (b) incremental

Una seria limitación en los encoders incrementales de un solo conjunto emisor – detector es que el conteo no brinda información de dirección (un giro en el sentido de las agujas del reloj se interpretará de manera similar que el giro en contra). Para resolverlo, se inserta un segundo par emisor – detector, el primero denominado canal A, y el segundo como canal B. El canal B se posiciona tal que estará un cuarto de ciclo desplazado respecto al canal A (90 °). Cuando el canal A esté al inicio del ciclo de onda, el canal B estará en las tres cuartas partes del “ciclo anterior”, mejor dicho el canal B alcanzará la posición inicial del canal A luego de un cuarto de ciclo. Esta diferencia de fase se denomina cuadratura. Los circuitos digitales externos podrán entonces fácilmente determinar la dirección de giro, ya que miden la diferencia de fase cuando detectan por flanco que señal de qué canal “llega” primero. Las prestaciones de un encoder incremental se amplían con la inclusión de un tercer canal de salida, llamado cero ó de referencia, que establece la posición de inicio de conteo y con cada pulso del mismo se denota una revolución. Un esquema de encoder incremental de doble canal se muestra en la figura 2.52

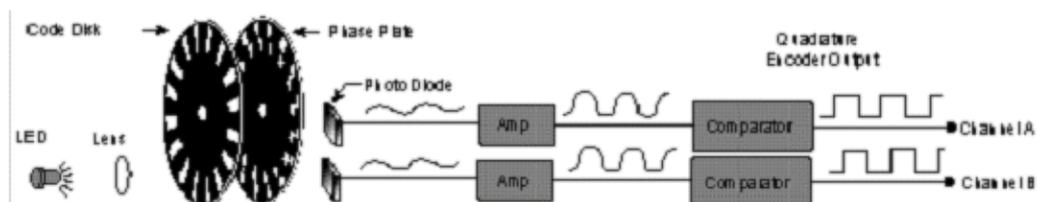


Fig 2.52. Encoder incremental de doble canal

Es posible por último aumentar efectivamente la resolución del encoder incremental de dos canales, si se toma en cuenta las dos señales de tren de pulsos y en ambas detección para

flanco de subida y bajada, entonces dos señales por dos flancos el resultado es cuadruplicar la resolución convencional. Un ciclo de señal puede dividirse en cuatro estados (OFF/ON, OFF/OFF, ON/OFF and ON/ON), combinando el estado lógico entre ambos canales.

2.12.2. Sensores de proximidad³¹.

El sensor de proximidad es un transductor que detecta objetos dentro de un proceso que se encuentren cerca del elemento sensor. Mientras su uso se ha vuelto más difundido en procesos de todo tipo y una de las herramientas básicas en la automatización de hoy, entender su operación es esencial. Aunque la capacidad de estos sensores se ha mejorado (incluyendo su precisión y repetitividad), su principio básico se mantiene. Por definición el sensor de proximidad es un dispositivo diseñado para detectar presencia de un objeto (la analogía binaria de presencia ó ausencia se interpreta como dos estados “SI”, ó “NO”, por esto también se los denomine sensores binarios), o la “proximidad” del objeto u objetivo según el rango que posea.

Existen distintos tipos de sensores de proximidad según el principio físico que utilicen. Vale señalar a los dispositivos de principio puramente mecánico y que fueron los primeros en servir para la detección de presencia: interruptores mecánicos, finales de carrera, micro – switches, válvulas limitadoras, entre otros. Por su simplicidad, relativa durabilidad y reducido precio aún se utilizan en aplicaciones sencillas, no muy rápidas ni de elevada precisión y muchas veces con procesos que involucren contacto con el objeto; sin embargo han aparecido sensores de proximidad que fueron ideados y construidos para, entre otras cosas:

- Posibilitar detección de presencia ó proximidad sin contacto
- Elevar la precisión y rapidez de detección
- Tiempo de respuesta menor del dispositivo sensor (tiempos de conmutación menores)
- Mas robustos mecánicamente
- Útiles incluso para entornos de trabajo explosivos, atmósferas altamente corrosivas, etc.

³¹ Jonson, Curtis: Process control Instrumentation

Los más comunes son los interruptores de posición, los detectores capacitivos, los magnéticos, los inductivos, ópticos y ultrasónicos; el proyecto se centrará en dos tipos de sensores para analizar: los magnéticos y los inductivos.

- **Sensores de proximidad magnéticos.**

Dispuestos a sensor la presencia ó proximidad de objetos, los sensores magnéticos fundamentan su desempeño con el campo magnético incorporado en los objetos a ser sensados. Son un tipo de sensores sin contacto que poseen varios subtipos de acuerdo a su naturaleza de señal:

- Analógicos.
- Binarios, sin contacto, salida eléctrica
- Otros tipos de señal de salida.

Resaltando los más utilizados como los sensores de tipo binario, y recurriendo a su característica de detección de presencia ya que su señal de respuesta será “alta” ó “baja” según la lógica binaria en relación a presencia ó ausencia cierta del objeto. Incluyen otras características tales como:

- Incorporan altísimas sensibilidades ante objetos magnéticos.
- Los sensores detectan imanes a través de todos los materiales no magnetizables incluyendo el acero inoxidable, los metales no ferrosos, el aluminio, el plástico, la madera y el vidrio.
- Ofrecen altas frecuencias de conmutación (de hasta 5,000 Hz)
- Alcances de detección de hasta 70 mm
- Detección de posición confiable sin importar la orientación del imán
- Excelente repetitividad y características operativas estables

Como ejemplo de aplicación, suponer la medición de posición de un pistón en un cilindro, se puede fijar un imán en la parte móvil, y el sensor captará el campo magnético (por ende la posición instantánea del pistón) aún a través de la pared gruesa del cilindro. El elemento

sensor básico para la mayoría de sensores disponibles puede consistir de un interruptor mecánico activado por magnetismo denominado sensor Reed³², ó por efecto Hall³³, los cuales se detallan a continuación:

- Sensor Reed: Posee uno ó varios contactos eléctricos que actúan no por contacto físico, sino por campo magnético externo (son láminas recubiertas de material ferromagnético atraídas por el magnetismo externo) y ejercen la apertura ó cierre de contactos por este fenómeno. Los contactos usualmente vienen herméticamente sellados al vacío ó en medio de un gas inerte. En algunos casos poseen un indicador (LED) para mostrar el estado del sensor. Un esquema de sensor Reed se muestra en la figura 2.53.
- Sensor de efecto Hall: Se sustentan en la generación de una diferencia de potencial transversal en un elemento conductor ó semiconductor por los cuales circule corriente, causada por un campo magnético presente en el mismo en dirección perpendicular. Los portadores mayoritarios del elemento sensor actuarán como interruptor según el campo magnético que los atraviese. Un ejemplo de sensor de efecto Hall se muestra en la figura 2.54.

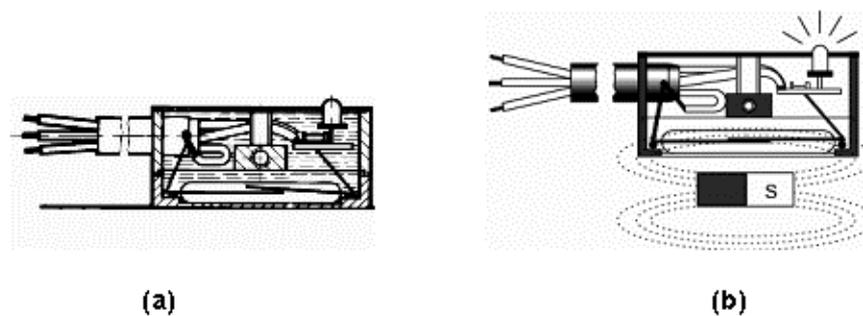


Fig 2.53. Sensor de proximidad Reed (a) Desactivado; (b) Activado

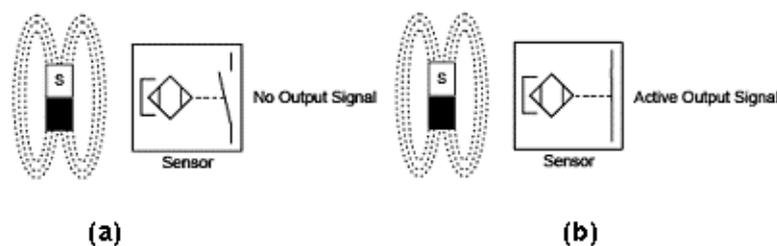


Fig 2.54. Sensor de proximidad de efecto Hall (a) Desactivado; (b) Activado

³² <http://www.standezelectronics.com/magsen.htm#sps>

³³ <http://www.standezelectronics.com/magsen.htm#hps>

Hay que tomar en cuenta minuciosamente las especificaciones técnicas de cada tipo de sensor, así como recomendaciones al momento de implementarlos en una aplicación real. En ambos casos, la interferencia de campos magnéticos ajenos al que produzca el objeto a sensarse conllevaría detecciones erróneas, en este caso se recurre a un procedimiento denominado apantallado del sensor; en sensores Reed debe adecuarse con protección contra arco eléctrico entre contactos por la permanente conexión y desconexión, así como para contrarrestar cargas inductivas.

En los sensores Reed posee un denominado “switching” analógico, porque son contactos metálicos los que indican la proximidad, posee una confiabilidad aceptable para conmutación de cargas medianas a grandes (puede hacer conmutación directa en cargas que manejen hasta los 2.5 A), y son económicos; en los sensores de efecto Hall se da en cambio un “switching” digital, ya que los portadores del elemento conductor ó semiconductor producen los estados alto y bajo como encendido ó apagado, el tamaño físico se reduce respecto a los Reed, mayor duración, elimina las protecciones por arco e inductivas, manejan cargas pequeñas.

- **Sensores de proximidad inductivos³⁴.**

Este tipo de sensores fueron uno de los primeros creados y desarrollados para detección de proximidad. Se puede reseñar didácticamente el principio físico de funcionamiento cuando se han visto las “líneas” de campo creadas por un imán al acercarlo a polvo conteniendo partículas de hierro. Los sensores inductivos de proximidad crean las líneas de dicho campo magnético en la misma forma. Cuando se inserta un objeto metálico dentro del campo del sensor, aquel campo se “corta”, alterando la fuerza magnética circundante al sensor.

Son una clase de sensores que detectan sólo materiales ferromagnéticos. Son de gran utilización en la industria en aplicaciones de posicionamiento, control de presencia ó ausencia, detección de paso ó atasco, codificación de posición y de conteo. Han sido diseñados para trabajar con el campo magnético que genera y detectando las pérdidas de

³⁴ http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_inductivo

corriente del mismo debido a la proximidad al sensor de materiales ferromagnéticos. La variación en la corriente del sensor es a causa de la degradación del campo magnético.

Este efecto dispara la salida del sensor (dispuesto en un circuito resonante LC), en su posición de reposo posee una amplitud y frecuencia dadas de oscilación de señal, cuando se detecta la proximidad del objeto (introducirá corrientes parásitas en el circuito magnético), se atenúa la amplitud de esa señal y con el correspondiente cambio en la corriente. El circuito sensor reconoce este cambio de la amplitud y genera una señal que conmuta la salida de estado sólido ó la posición “ON” y “OFF”. Un ejemplo de sensor inductivo se muestra en la figura 2.55.

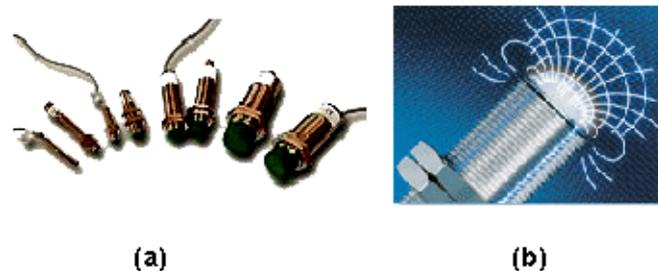


Fig 2.55. (a) Sensores de proximidad inductivos, (b) Líneas de campo magnético en el sensor

El sensor consiste en una bobina con núcleo de ferrita, un oscilador LC, un sensor de nivel de disparo de la señal y un circuito de salida encapsulados muchas veces en forma cilíndrica, con un material para apantallado. La distancia de detección de proximidad es variable, típicamente entre 0.8 a 10 mm., algunos alcanzando detección hasta los 250 mm. El promedio más alto que alcancen estos dispositivos se encuentra hasta los 40 mm. de separación. Cuando un sensor inductivo se dispone a sensar distancia, se refiere a la capacidad del sensor del “objeto detectable estándar”. Se define como la detección de un objeto metálico magnético pulido de 1 mm. de ancho y espesor por parte del sensor. Si el material a ser detectado no es metal ferromagnético, se tendrá una distancia efectiva de sensado diferente (algunos si detectan materiales aunque no sean ferromagnéticos), por ejemplo en el cobre tiene un 30 % de la distancia efectiva del hierro, el aluminio con el 40%, el acero inoxidable, 80%. En la figura 2.56. se puede apreciar cómo varía la distancia de detección en función del material a detectar y el tamaño del mismo.

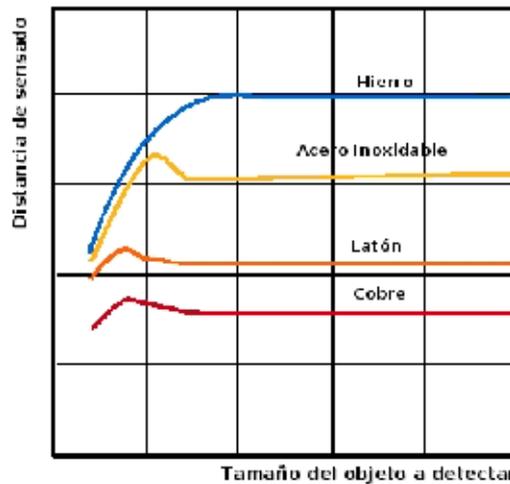


Fig 2.56. Curvas de distancia de detección de proximidad para varios materiales

El diámetro del sensor encapsulado puede encontrarse desde 5 mm. a un diámetro típico de 30 mm., su disposición en dos formas: con blindaje ó sin blindaje. Los que poseen blindaje limitan la salida de líneas de campo magnético a circular sólo por la cara efectiva del sensor; los no blindados carecen de esta protección, así que las líneas de campo circulan de manera normal. Un sensor con blindaje puede ser embebido en el material que se lo monte sin afectar el campo de detección. Sólo reaccionará si el objeto a detectar pasa en frente al sensor; un sensor sin blindaje permite al campo magnético detección no solo al frente, sino de forma horizontal y vertical. Esto puede causar problemas en algunas aplicaciones si el sensor sin blindaje se monta junto a otro ó embebido en una pieza de metal. Los que no poseen blindaje pueden sensar mayores distancias que aquellos con blindaje. Para comparar la acción del campo entre blindados y no blindados se muestra en la figura 2.57 a un sensor de cada tipo.

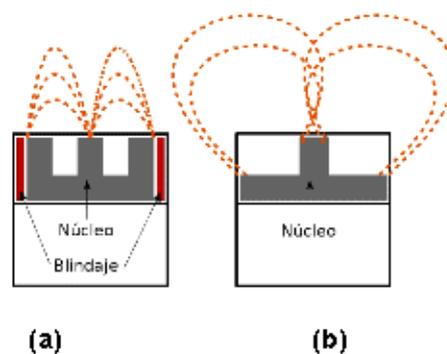


Fig 2.57. (a) Sensor de proximidad blindado; (b) Sensor no blindado

Estos dispositivos poseen histéresis, es la diferencia entre la distancia de activación y desactivación. Cuando el objeto se acerca al sensor, éste lo detecta a la “distancia de detección”. Lo que ocurre al alejar el objeto del sensor es que no lo ha dejado de detectar inmediatamente que excede la anterior distancia, si no cuando alcanza la “distancia de reset”, que es igual a la distancia de detección más la distancia adicional provocada por la histéresis. El objeto al ser detectado y cuando “entra” al área de histéresis, debe físicamente abandonar totalmente esta área para que el estado del sensor cambie. La figura 2.58. muestra un sensor de proximidad con el detalle de dichas distancias.

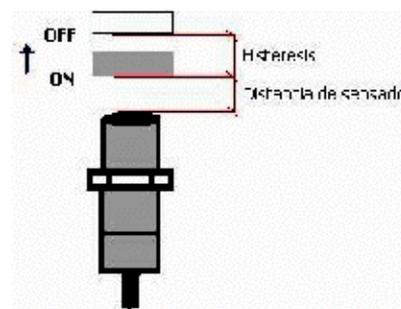


Fig 2.58. Distancias de detección y de histéresis del sensor de proximidad

El procedimiento para detección de proximidad se puede establecer en los estados que pase el mismo³⁵, y en la figura 2.59 se muestra la representación gráfica de este:

1. Ausencia del objeto a detectar: La amplitud de señal oscilatoria es máxima, la salida se mantiene inactiva (OFF).
2. El objeto se acerca a la zona de detección: Se producen corrientes parásitas ó de Foucault, con esto el circuito detecta una disminución en la amplitud por debajo del estado de reposo, y activa la salida.
3. El objeto se aleja de la distancia de detección: Cesan las corrientes de Foucault, la señal oscilatoria aumenta su amplitud, y cuando eso se alcanza la salida del sensor vuelve a su estado inactivo.

³⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_inductivo

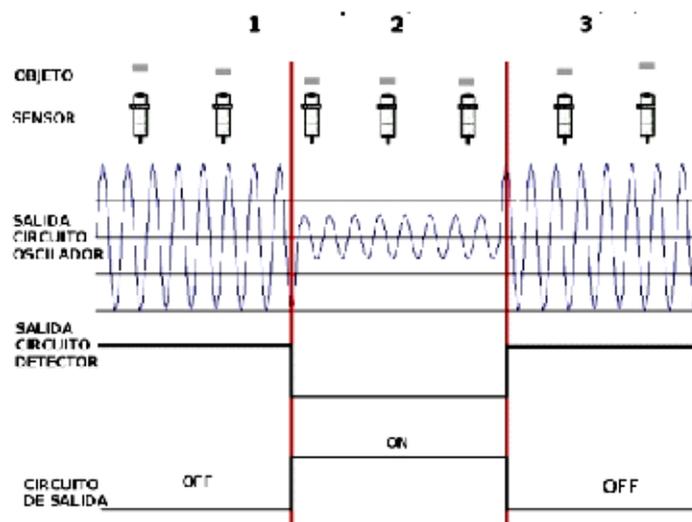


Fig 2.59. Acción del objeto a sensarse en la señal de salida del sensor

Como en sensores de todo tipo, hay que tomar en cuenta consideraciones para el óptimo desempeño, mencionando algunas:

- Asegurarse que se utilice el sensor inductivo con los requerimientos nominales de alimentación, ya que alimentándolo con un voltaje menor puede resultar en campo magnético débil y por esto la distancia para que detecte se reduzca.
- Para grandes distancias es preciso tomar en cuenta y contrarrestar la capacitancia parásita que se adiciona.
- Cuando se utilizan múltiples sensores en un solo arreglo, existe un fenómeno denominado interferencia mutua. Ocurre cuando el campo magnético de un sensor afecta a otro sensor contiguo causando que el otro dispare su señal de salida. Este falso disparo puede ser errático y difícil de detectar. Se recomienda revisar las distancias mínimas entre sensores dadas en la hoja de datos para evitar esto.
- La superficie del objeto a detectar no debe ser menor que el diámetro del sensor de proximidad. Si fuera menor que le 50% del diámetro del sensor, la distancia de detección disminuye sustancialmente.
- Guardar las características de protección y demás especificaciones de fábrica.

- **Sensores ambientales³⁶.**

Las variables involucradas entre Astronomía e Instrumentación, sobre todo para el óptimo desempeño y mantenimiento de observatorios son las ambientales ó atmosféricas. Permiten con su captación a los dispositivos de control impedir la operación de los elementos del observatorio ó suspender los mismos en caso de condiciones ambientales no favorables. A saber tiene casi las mismas características de una estación meteorológica: mide temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, cantidad de lluvia ó nieve, detección remota de nubosidad, presión barométrica, radiación solar, etc. Tiene propósitos de monitoreo, reporte, data logging y mediante el controlador principal, ejercer acciones de control.

Emplea varios tipos de sensores como resistivos, capacitivos, semiconductores, tacométricos, de radiación infrarroja, entre otros. El principal tipo de variable a sensor en el proyecto es la humedad, presentada de manera específica en la humedad relativa y en la intensidad de precipitación. Es primordial la medición precisa de esta variable, ya que es contra la humedad más que nada que se debe proteger las instalaciones del observatorio, para el resto de variables existe una estación meteorológica que funciona en los patios del observatorio y que trabaja emitiendo reportes del tiempo de idéntica forma que el INAMHI³⁷.

- **Sensores de humedad**

Hay que partir del impedimento visual para los instrumentos ópticos del observatorio que genera la humedad presente en la atmósfera, llámese esta alta densidad de nubes, precipitaciones en forma de agua ó partículas de hielo, neblina, bruma. Estas son solo algunas de aquellas que impiden lo que en Meteorología se denomina visibilidad, es la medida de la opacidad de la atmósfera, y por lo tanto, es la distancia mayor desde la que el ser humano puede observar objetos con el uso de la visión normal. Mientras exista menor cantidad de humedad en el aire y de nubes en el cielo, se dan entonces las condiciones ideales para la observación astronómica.

³⁶ <http://www.inahmi.com.ec/educativa/wmo8final.pdf>

³⁷ www.inamhi.gov.ec

La humedad es la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Se puede definirla en términos de medida absoluta como cantidad de vapor de agua por volumen de aire (Kg. de agua por Kg. de aire seco). Sin embargo, esta medida no indica que tan seco ó húmedo está el aire, es por ello que se utiliza la medida de humedad relativa, que es el porcentaje entre la presión parcial del vapor de agua a una temperatura dada y la presión de vapor de agua en un volumen de aire completamente saturado de vapor. Equivale al porcentaje de humedad ó qué tan saturado de vapor se encuentra el volumen de aire a medirse. Existe un límite para la cantidad de vapor de agua que el aire puede contener a cierta temperatura; cuando se sobrepasa dicho límite el vapor se condensa, formando así la neblina ó precipitaciones. La ecuación³⁸ de la humedad relativa toma en cuenta a las presiones de vapor de agua mencionadas:

$$RH (\%) = \frac{P_{vapor\ agua}}{P_{saturacion}} * 100\% \quad (2.35)$$

Para ambientes secos, la electricidad estática se acumula con mayor facilidad, lo que puede provocar daños en dispositivos electrónicos que se adjunten a la operación en observatorios como computadores personales, microcontroladores, manejadores de potencia. La humedad del aire que esté dentro del domo del observatorio puede entonces manipularse con la apertura ó cierre de compuertas; debe existir un porcentaje de humedad que minimice la generación de electricidad estática pero no debe ser tan elevada, primero porque es síntoma de una inminente precipitación ó presencia de niebla, y segundo porque la estructura del domo está hecha de hierro, muy propenso a la oxidación. Por esto el sentido de humedad adquiere importancia.

Un factor muy importante en la medición de humedad es la temperatura. Define la presión de saturación de vapor. Un pequeño cambio en la temperatura especialmente a una alta humedad tendrá un efecto significativo en el porcentaje de humedad, ya que la presión de saturación también cambiará. Por tanto se debe saber la temperatura exacta al comparar los valores medidos de humedad relativa. En un sistema cerrado, dos sensores en diferentes ubicaciones y midiendo diferentes temperaturas obtendrán distintos valores de humedad relativa, por lo que los sensores de medición y de referencia han de instalarse lo

³⁸ Glosario de términos INAMHI

más próximos posible. Ya que la medición de humedad depende de la de temperatura, la característica del proceso será lenta.

Los sensores disponibles en el mercado para medición de vapor de agua como humedad relativa pueden ser clasificados por el principio de transducción que utilicen para convertir la concentración de vapor en señal eléctrica:

- Capacitivo
- Resistivo
- Piezoresistivo

Un factor clave que permite a los sensores ser accesibles en costo es el uso de películas de material en estado sólido que interactúe con el vapor de agua para producir una medición eléctrica de buena repetibilidad. Otros tipos de sensores como de tipo acústico u óptico también están disponibles pero no son tan ampliamente utilizados por su elevado costo y complejidad.

Los efectos del cambio de temperatura repercuten en la calibración de los sensores, el más preciso de este tipo es el de espejo empañado. Los sensores basados en principio capacitivo poseen una precisión de $\pm 1.5\%$ RH. Necesitan recalibración frecuente. Los sensores capacitivos calibrados típicamente poseen entre $\pm 2\%$ a $\pm 3.5\%$ de RH. Los de tipo resistivo con precisión entre $\pm 5\%$ al $\pm 10\%$. Ejemplo de sensor de humedad se muestra en la figura 2.60.

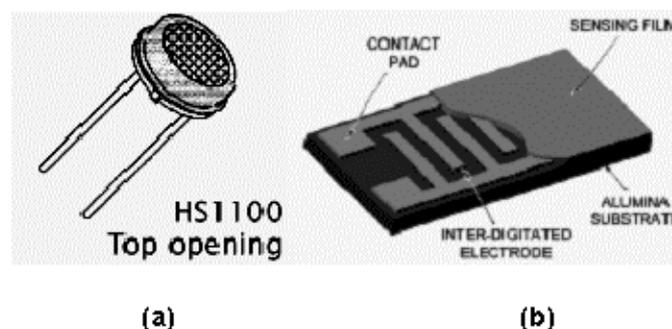


Fig 2.60. (a) Sensor de humedad relativa Humirel HS1100; (b) Estructura interna de la película higroscópica en sensores capacitivos y resistivos

2.13. INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL Y SOFTWARE APLICADO

La instrumentación virtual es el uso de software personalizado y hardware modular de medición de señales como temperatura, presión, nivel, caudal, etc, para crear sistemas de medición definidos por el usuario, que se denominan instrumentos virtuales³⁹. Se involucra frecuentemente el uso del computador personal ó PC para llevar a cabo el funcionamiento de dichos instrumentos.

El PC comienza a ser utilizado para realizar mediciones de fenómenos físicos representados en señales de corriente (Ej. 4-20mA) y/o voltaje (Ej. (0-5Vdc). Sin embargo, el concepto de "instrumentación virtual" va más allá de la simple medición de corriente o voltaje, sino que también involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales específicas. Es decir, el instrumento virtual no se conforma con la adquisición de la señal, sino que también involucra la interfaz hombre-máquina, las funciones de análisis y procesamiento de señales, las rutinas de almacenamiento de datos y la comunicación con otros equipos. El esquema simple de esta convergencia se muestra en un ejemplo de elementos de laboratorio para instrumentación virtual, figura 2.61.



Fig 2.61. Esquema de instrumentos virtuales en un laboratorio

³⁹ Wolf, Stanley y Smith, Richard: Student reference manual for electronic instrumentation laboratories.

2.13.1. Definición de instrumento virtual

Los instrumentos “tradicionales” o convencionales son hechos con componentes de hardware pre-definidos por el fabricante, como multímetros u osciloscopios, su funcionalidad viene entonces limitada de fábrica. Esto les resta versatilidad, y propende a que queden obsoletos más rápido. La ventaja del instrumento virtual es su componente de software, que permite reemplazar un instrumento convencional complejo, costoso con un dispositivo más simple y económico, aparte de la enorme ayuda que significa que el usuario y no el fabricante definan la función del instrumento.

La instrumentación virtual ha crecido significativamente desde su creación. El instrumento virtual es definido entonces como una capa de software y hardware que se le agrega a un PC en tal forma que permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando su propio instrumento electrónico "hecho a la medida". Adicionalmente, existen plataformas de software destinadas a la instrumentación virtual como Labview de National Instruments⁴⁰, Microsoft Visual Studio de Microsoft, Matlab, entre otros con lenguaje de programación gráfica que sirven para desarrollar estos sistemas. Existe una nomenclatura bastante usual para la porción de código fuente (programa) que funciona como instrumento virtual, y es el de “virtual instrument” ó “VI”, con el cual el usuario aprecia en la pantalla del PC un panel de control con la misma apariencia y función de uno real, ejerciendo las debidas acciones de control con sus elementos, y complementa la medición de señales con el posterior procesamiento y despliegue de las mismas. El panel muestra la etapa funcional para el usuario del VI, mientras que el código fuente puede estar aparte pero obviamente vinculado a éste, en la figura 2.62 se muestra un ejemplo sencillo de VI, con su panel principal y su programación dispuesta en lo que se denomina diagrama de bloques.

⁴⁰ www.ni.com

2.13.2. Hardware que trabaja en conjunto al software de instrumentación virtual.

En el instrumento virtual, el software es la clave del sistema, a diferencia del instrumento tradicional, donde la clave es el hardware. Pero los procesos demandan elementos para medición, automatización y control que si bien son factibles de implementarlos en su mayoría por software, el hardware que depende del software de instrumentación virtual debe ser quien responda al proceso por la manipulación del programa de instrumento virtual (lo que se opere en el panel debe existir la respuesta en el hardware). Un diagrama general de un sistema integrado se muestra en la figura 2.63.

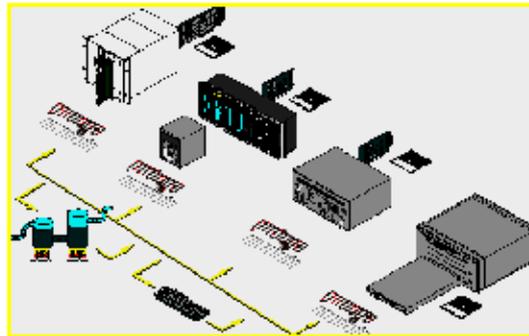


Fig 2.63. Componentes del sistema integrado de instrumentación virtual

Se puede partir con el uso del hardware más común en instrumentación que es el PC. De hecho, un sistema de instrumentación virtual basado en PC tendría como dispositivo principal a varios tipos de computador (desktop, laptop, PDA, pocket PC, etc). Las funcionalidades de estos dispositivos de hardware se han incrementado notablemente para muchos campos incluido el de la instrumentación virtual. Tienen propósito general, pero se desempeñan para la instrumentación casi como lo haría un dispositivo dedicado. El hardware considerado estándar en ciertos sistemas de instrumentación se denomina PXI (Extensiones PCI para instrumentación), que consiste de un chasis con ranuras para disponer al hardware en forma modular controlado por un computador embebido. Dispone del mismo hardware de un PC ó similar pero en una disposición más versátil y compacta. Una representación del controlador PXI en su disposición modular se muestra en la figura 2.64.

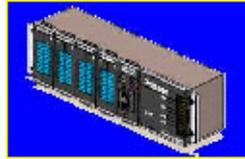


Fig 2.64. Computador industrial ó controlador PXI

Para que el sistema de instrumentación virtual pueda realizar mediciones y controlar procesos, necesita una gama de hardware adicional⁴¹ que se describe brevemente:

- GPIB: Es un protocolo estándar de comunicaciones para instrumentos que lo soporten, desarrollado inicialmente por Hewlett Packard. Con esto un PC puede conectarse a dicho instrumento y operarlo para medición, adquisición de datos de forma virtual (ya no se necesita que se opere manualmente el instrumento). Solo se necesita el tablero GPIB instalado en la PC y el cable para conectarlo al instrumento.
- Dispositivos modulares: Son una versión “para PC” de los instrumentos tradicionales (osciloscopios, multímetros, generadores de onda, etc) que se insertan al elemento principal del sistema modular PXI.
- Adquisición de datos: El propósito es el de medir una ó múltiples variables físicas, el hardware de adquisición de datos comprende sensores, acondicionamiento de señal que adquieren los datos provenientes de las variables, para finalmente llegar en formato adecuado al software de procesamiento y despliegue de datos en la PC. Dichas etapas antes de la PC se conoce como adquisición de datos (DAQ por sus siglas en inglés). Una muestra de tarjeta DAQ se ilustra en la figura 2.65.
- Sistema distribuido de entradas – salidas: Posee una cierta similitud con el hardware de adquisición de datos, con la diferencia de que ejerce la adquisición comunicándose con módulos de medición distribuidos a grandes distancias. Para esto se vale de protocolo serial ó Ethernet en muchos casos. Los módulos de este tipo se muestran en la figura 2.66.

⁴¹ www.ni.com

- Otros: El avance en instrumentación virtual ha agregado varias funcionalidades, como la adquisición de imagen ó control de movimiento.



Fig 2.65. Tarjeta de adquisición de datos

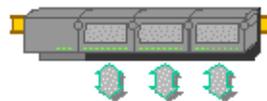


Fig 2.66. Módulos de medición entrada – salida de sistema distribuido

2.13.3. Entorno de software.

Un componente fundamental de la instrumentación virtual es el software. Se explicó como están integrados hardware y software dentro del sistema; los diferentes paquetes de software para computador son en común un entorno de programación gráfica. La misión de gran parte de estas plataformas de software se menciona, entre otras:

- Para personalizar la interface de usuario.
- Control del hardware de instrumentación en aplicaciones como control de instrumentos, adquisición de datos, sistemas distribuidos, control en tiempo real, etc.
- Utilización de complejas rutinas de análisis para procesamiento matemático y de señales.
- Presentación de datos en varios formatos.

Uno de los más conocidos y utilizados paquetes de software para instrumentación virtual es Labview, un entorno de programación gráfica con funciones específicas para aplicaciones de instrumentación, control y diversas ramas de la ingeniería, existen otras plataformas menos utilizadas pero conservan el mismo principio.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISEÑO

2.14. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

En observatorios astronómicos automatizados alrededor del mundo se exigen normas y requisitos imperiosos con el propósito de elevar al máximo el aprovechamiento de los dispositivos dedicados a este fin. Las normas en Automatización y control deben ajustarse a las elevadas exigencias de las normas en Astronomía, cabe recalcar que es una de las áreas de la Ciencia donde se demanda los más altos niveles de precisión y calidad. Con esto, los requerimientos del sistema de observación de astros se verán reflejados en las normas de Automatización partiendo de las normas de Astronomía estudiadas en el primer capítulo.

Entonces se mencionan las normas en Astronomía para observatorios astronómicos⁴², sintetizadas a literales concretos para una correcta interpretación (incluidas ciertas normas estructurales):

- Tipo y ubicación de montura según la geometría asociada y coordenadas geográficas.
- Alineación precisa de ejes en montura, telescopio y domo respecto a puntos de referencia en la esfera celeste.
- Tanto montura como domo deben tener un determinado nivel de rigidez torsional y perfecto balance en sus partes móviles.

⁴² <http://www.lna.br/~det/Projetos/Cupula/dat/Domespec.doc>
http://www.dfmengineering.com/news_observatory_design.html

- El piso del observatorio debe estar lo más libre de obstáculos y firme posible para aislar a la montura de vibraciones.
- Los equipos de Astronomía, de Instrumentación y de potencia instalados deben aislar en lo permisible su vibración.
- La altura del piso del observatorio al eje mecánico del telescopio debe brindar comodidad para la observación.
- Para domos medianos a grandes es posible ubicar una compuerta de entrada al observatorio en el piso del mismo, con peldaños convencionales ó en espiral provenientes de la base del observatorio.
- El ancho de la compuerta de acceso en el piso debe tomar en cuenta no acercarse demasiado al riel de domo y al espacio de movimiento del telescopio así no interfiere en su operación, y no debe ser demasiado pequeña para el paso de personas.
- La ubicación de la compuerta se establece en el cuadrante Sur – Oeste ó Sur – Este del observatorio.
- No utilizar ningún tipo de escalera en vez de peldaños.
- Debe poseer una salida alterna de emergencia que no se encuentre bloqueada y con las debidas seguridades.
- El telescopio apuntará mediante la montura hacia cualquier astro en la esfera celeste es decir, podrá ser direccionado a cualquier coordenada celestial válida.
- Debe restringir el movimiento del eje óptico del telescopio hasta un límite en su coordenada de altitud entre 7 a 10 grados sexagesimales (28 – 40 minutos de arco) sobre el horizonte del observatorio (no debe bajar dicho límite de lo contrario el eje óptico apuntará hacia las montañas, elevaciones circundantes ó incluso al piso).
- La estructura de domo deberá poseer una abertura central lo suficiente para no obstruir el campo de visión del telescopio y a la vez proteja al mismo de agentes externos que perturben o alteren la calidad del proceso de observación.

- Como se ha detallado en el capítulo 1, existen la velocidad de desplazamiento y la de rastreo de domo, teniendo gran diferencia una de otra y exigiendo valores de resolución en los sensores de posición no superiores a ± 1 segundo de arco.
- El azimut de domo tendrá una precisión de posición de $\pm 1^\circ$.
- La experiencia en operación de domos recomienda una velocidad de desplazamiento no mayor a $6^\circ/\text{segundo}$ ⁴³ (360° en 60 segundos ó 1 RPM). Los valores idóneos son entre $2^\circ/\text{seg}$. a $4.8^\circ/\text{seg}$.
- Obviamente debe soportar las variables atmosféricas, dotándolo de los sensores específicos para prevenir al observatorio en caso de lluvia, nubosidad u otra condición que dificulte la observación
- La maquinaria, equipos e instrumentos deben en lo posible ser accesibles para su mantenimiento.
- Tomar en cuenta recomendaciones de fabricantes tanto de telescopio y de domo.

Los requerimientos de sistema para observatorios involucrados con la Automatización, control y Electrónica en general⁴⁴ son mencionados en los siguientes literales:

- La ubicación del cuarto de control en observatorios modernos será en un sitio aparte del espacio ocupado por telescopio, domo e instrumentos vinculados; al norte del telescopio con una ventana para visibilidad completa y debe quedar “un piso” bajo el nivel del piso del observatorio.
- En caso de tener suficiente espacio dentro del domo para instalar y operar con los instrumentos, deben colocarse en el cuadrante Norte del mismo.
- El tipo de control puede ser local ó remoto, y diseñado de forma modular para una fácil instalación y puesta en marcha.

⁴³ <http://www.dppobservatory.net/DomeAutomation/DomeDriver.htm>

⁴⁴ <http://www.astro.uson.mx/Infraestructura/ocs/Controlsys.htm>

- El cuarto de control debe tener un área mínima de 10 m², preferentemente 19 m².
- Debe proveer de tomas de corriente en las paredes del domo ó en el piso del observatorio, las tomas deben tener hilo de tierra y estar debidamente aterrizadas.
- Debe en lo posible proveer al observatorio y cuarto de control de cableado de red y extensión telefónica a través de un tubo conduit en el piso para comunicación de alta velocidad como Ethernet.
- El tipo de cable UTP para proveer de conexión Ethernet al observatorio debe ser mínimo de categoría 5e.
- Dependiendo de las prestaciones del observatorio puede incorporarse cualquier tecnología de red inalámbrica para los instrumentos que deban acceder a ella, procurando en lo posible tener línea de vista.
- La iluminación interna del observatorio debe ser con luces de color blanco de baja potencia para trabajar en el panel de instrumentos del telescopio y de intensidad regulable con dimmer.
- De manera opcional el sitio donde se hallan telescopio y domo puede poseer un circuito cerrado de televisión ó cámara Web para supervisión.
- La alimentación para los actuadores y demás dispositivos que se encuentren adosados a la parte móvil del domo deben ser suministrados con rieles electrificadas que se ubiquen en disposición paralela al riel mecánico de giro.
- El motor eléctrico del sistema de domo y de telescopio utilizará un sistema de control a lazo cerrado (realimentación de posición mediante encoder acoplado a la parte giratoria).
- El mecanismo de movimiento de domo debe tener motor eléctrico con juego de engranes reductor de velocidad, manejador de potencia (variador de frecuencia) para motor AC, freno de DC y rueda de fricción viscosa para acoplar al encoder.

- El sistema de apertura – cierre de compuertas incorpora casi todos los mismos elementos, tiene además respaldo por batería de 12 V ó UPS en caso de falla de energía.
- Debe tener un sistema de auto – apagado en caso de que se lo mantenga por un tiempo considerable encendido pero sin operar.

3.1.1. Análisis de requisitos en el observatorio.

En el caso del Observatorio Astronómico de La Alameda cumple con ciertos requisitos básicos, y aunque su diseño ya es antiguo no significa que eso vaya a impedir la aplicación de normas modernas, al analizar las anteriormente citadas se establece que:

- La montura mantiene al telescopio en perfecta alineación, con facilidad de movimiento en un perfecto balance, las mismas características aplicadas al domo.
- La distancia entre el eje de rotación de telescopio al piso del observatorio es idónea para una cómoda observación.
- La compuerta de acceso al observatorio se encuentra en el piso del mismo, cuadrante Nor - este, con los peldaños en espiral ascendiendo alrededor de la base.
- El ancho de dicha compuerta es accesible para el paso de personas y no interfiere ni con la estructura móvil del domo ni con el campo de movimiento del telescopio.
- La abertura central de domo tiene el ancho suficiente (82 cm. de abertura comparado a 24 cm. del lente principal) para que, con una correcta alineación, permita total visibilidad para el lente del telescopio y el resto de la estructura protege a los equipos del observatorio de agentes externos.
- Actualmente el observatorio sólo tiene motorizado el eje de ascensión recta del telescopio, el cual trabaja únicamente a velocidad de rastreo para los distintos cuerpos celestes.

Hay que señalar las normas que el observatorio no cumple satisfactoriamente pero se pueden corregir ó no tomar en cuenta:

- El piso del observatorio es de madera y con años de desgaste, lo cual hace altamente propenso a vibraciones; es recomendable reparar ó reemplazar por completo el material del piso del observatorio.
- Tanto montura como domo están asentados sobre el cimiento fuerte y estable que conforma la base del observatorio, así que la maquinaria y equipos que se pretenda incorporar a ellos no sufrirán mayor perturbación por vibración.
- El observatorio actualmente no cuenta con una salida de emergencia, la cual debe buscar una alternativa en el corto ó mediano plazo.
- El eje del telescopio no posee límites en su coordenada de ascensión recta, lo cual puede provocar que el eje óptico apunte hacia el suelo ó elevaciones circundantes, aspecto que se puede corregir incorporando los sensores de posición.
- Se debe acondicionar los sensores atmosféricos junto a los actuadores para la debida protección ante lluvia ó condiciones meteorológicas adversas.
- La disposición de elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos tienen la alternativa de ubicarse en sitios accesibles para su correcta operación y mantenimiento.
- Los instrumentos de control se ubican en el cuadrante Norte del domo, posee dos tomas de corriente en el piso, aterrizadas pero que actualmente no están empotradas a la madera del piso.
- Mediante tubo conduit se dirigen las líneas de alimentación de energía e iluminación desde la base al interior del observatorio, sin embargo no existe una disponible para enviar cable de red ó extensión telefónica. En su defecto se está probando acceso a red mediante tecnología inalámbrica.

- Existe un solo bombillo fluorescente para iluminación en la compuerta de acceso en el piso. Debe adecuarse una iluminación como la recomendada justo sobre los instrumentos dentro del domo si se eligió operar desde allí.
- No posee circuito cerrado de televisión, cámara Web ó de seguridad instalada, pero si se opera el observatorio dentro mismo del domo no es necesaria.
- La alimentación para el sistema motor a instalarse en la parte móvil del domo deberá suministrarse con rieles electrificados que se adecuen en forma paralela al riel principal de domo.
- Cuando se instale el sistema motor, debe estar acompañado de un sistema sensor de posición para la realimentación.
- El sistema de rieles electrificados alimentará también al sistema de apertura – cierre de compuertas, que estará respaldado con fuente de CD ó por un UPS.

3.2. MODOS DE OPERACIÓN⁴⁵

Los modos de operación en observatorios astronómicos automatizados toman en cuenta a cómo el usuario manipula a los instrumentos del mismo, se los ha encasillado a los tres más comunes mencionándolos por su jerarquía, teniendo mucho parentesco con aplicaciones en otros campos de la ciencia:

- Modo de terminal automatizado con operación local ó remota: En este modo se manipularán todas las capacidades operacionales del sistema, soportará la información que llegue de todos los sensores y responderá a los requerimientos del mismo. El dispositivo principal de control y supervisión respecto a este sistema podrá ser de tipo local ó remoto como se ilustró en el capítulo 1. El usuario visualiza y manipula el proceso completo mediante un computador, así tiene interfase gráfica a través de instrumentación virtual.

⁴⁵ <http://www.homedome.com/info2a.htm>

- Modo de terminal automatizado para mantenimiento y diagnóstico: Realiza diagnósticos a bajo nivel en el sistema de control de domo para mantenimiento y optimización. Se accede de manera preferencial sólo de forma local (la disposición del núcleo de control del sistema es frecuentemente como terminal ó panel frontal). En algunos casos este modo puede incluir un menú para programación o configuración.
- Modo de operación manual: Este modo se incluye por el hecho de que bajo cualquier circunstancia el sistema automatizado no funcione, será en modo local, tendrá acceso directo a operar la etapa de potencia del sistema, puede adoptar la forma de un “paddle” con los respectivos botones para la ejecución de las tareas más simples (desplazar izquierda – derecha, rastreo izquierda – derecha, parada, apertura – cierre de compuertas). Nótese que al mover la estructura en este modo no se puede visualizar en el computador de supervisión, tan sólo el panel frontal del controlador de domo proporcionará información instantánea sobre la velocidad de movimiento, posición y apertura – cierre de compuertas, lo que resta un poco precisión al movimiento.

3.3. ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS DEL SISTEMA

El propósito de la automatización en este Observatorio debe orientarse a la facilidad de prestaciones para el usuario que realiza observaciones en el mismo. En el literal donde se analizan los requisitos en el Observatorio es posible notar ciertas pautas para aquello, sin embargo son resultado de una breve inspección a las instalaciones, a las cuales se les puede dar una solución simple e inmediata. Con el afán de automatizar por completo el proceso de observación, optimizando al máximo su funcionamiento y con la consigna de realizarlo sin afectar significativamente la solidez y estética de la estructura, vale mencionar los requisitos específicos a implementarse:

- Instalación de rieles electrificados⁴⁶ en paralelo a la riel mecánica del domo y el sistema completo para alimentación eléctrica, ya que permitirá el funcionamiento

⁴⁶ <http://www.astronomical.com/DomeControl.htm>

continuo del controlador principal y la etapa de potencia aún cuando la estructura se encuentre en movimiento. El sistema de tubería conduit en el piso puede llegar desde el tablero principal del Observatorio al domo para el suministro de energía.

- Adaptación del reductor mecánico (acople) entre sistema de manivela en domo y eje de motor eléctrico a instalar, indispensable para generar el movimiento suave de domo a varias velocidades. Esta es la modificación mecánica de mayor importancia en la estructura metálica de domo (puede utilizarse suelda eléctrica para empotrar el reductor).
- Instalación de panel principal de domo para acomodar el controlador principal, el variador de frecuencia, el acondicionamiento de señal para sensores, etc.
- Enlace de comunicaciones inalámbrico entre dispositivos instalados en domo y computador de supervisión en el cuarto de control. También puede enlazarse vía RF con el controlador de telescopio para que opere en modo esclavo. La comunicación será tanto de datos como de control y supervisión. Es altamente recomendado utilizar radiofrecuencia para la comunicación, por la característica giratoria del domo.
- Adecuación de actuadores en los mecanismos de apertura y cierre de compuertas en el domo, son modificaciones mecánicas secundarias pero no dejan de tener su utilidad.
- Instalación de sensores de posición, velocidad y atmosféricos en sus respectivas ubicaciones.
- Establecer una de las torres cercanas al domo para que desempeñe la función de cuarto de control, debido a su relativa cercanía y buena visibilidad. Esto facilitará el proceso de observación para su operación remota.
- En caso de suscitarse inconvenientes al querer utilizar una de las torres contiguas como cuarto de control ó para realización de sesiones de observación públicas, se debe reorganizar el espacio interior del domo para que el sitio donde se ubique el computador de usuario y el resto de instrumentos que se necesite para el control

estén tal como lo indican las normas internacionales y no interfiera en los movimientos de domo y telescopio.

- Crear una especie de manual de usuario para todo el sistema, además de información como planos eléctricos, estructurales, catálogos de los astros, parámetros del variador de velocidad, respaldo de software, entre otros.

3.3.1. Descripción de hardware.

Cada domo está basado en un diseño variando de fabricante en fabricante, sin embargo todos poseen elementos en común para su funcionamiento como:

- Controlador principal de domo.
- Controlador secundario para compuertas y demás actuadores en domo.
- Motores eléctricos para movimiento de domo y apertura de compuertas.
- Sistema variador de frecuencia en caso de utilización de motores AC.
- Finales de carrera en compuertas.
- Sensor de posición ó de azimut de domo.
- Interruptor de posición inicial de domo.
- Módulo de entradas – salidas e interfase de comunicación.
- Fuente ininterrumpida de poder u otro respaldo de energía.
- PC de usuario para supervisión y control.

Los elementos citados son los básicos dentro de un observatorio automatizado⁴⁷, y se muestran en el conjunto de la figura 3.1.

⁴⁷ http://observa-dome.com/pdf/Automation_Solutions.pdf

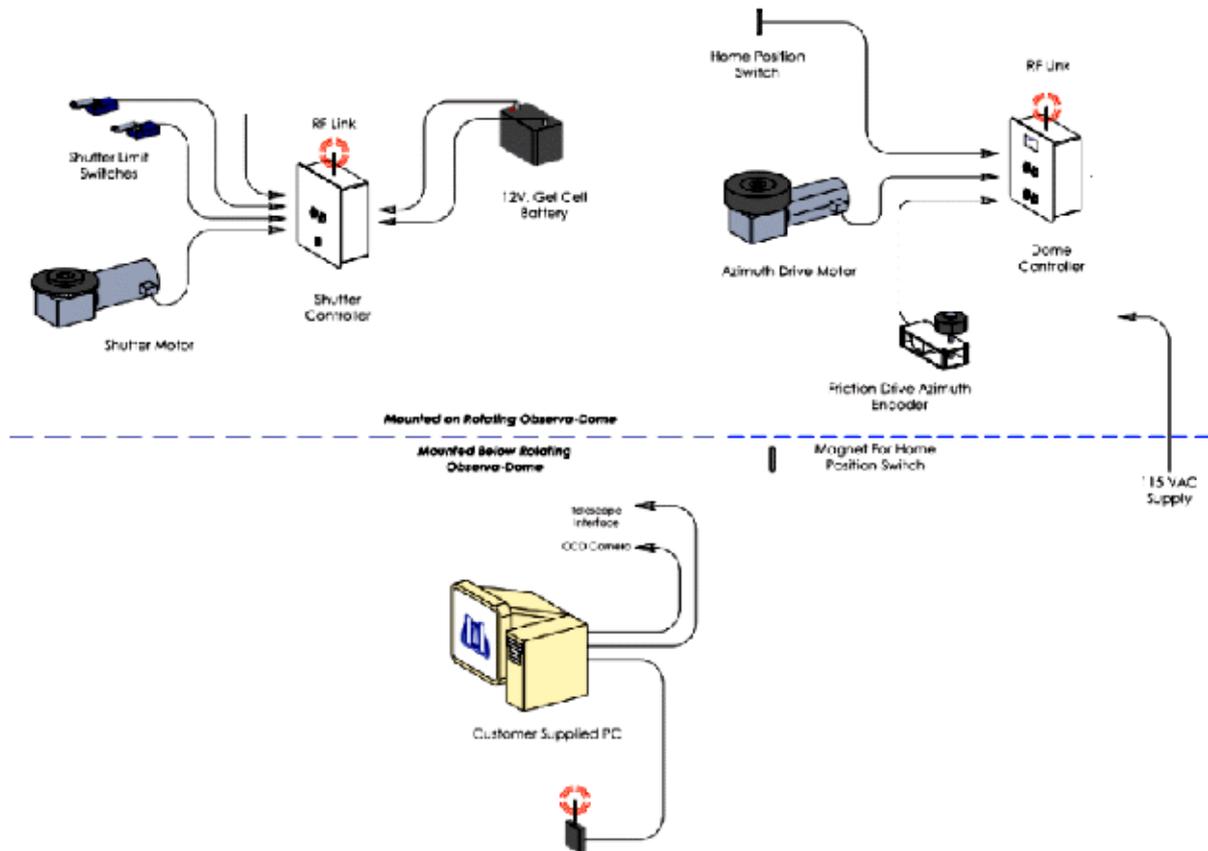


Fig 3.1. Esquema de la disposición de hardware en un observatorio astronómico automatizado

Todos los sistemas que aparecen en la gráfica anterior sobre la línea punteada azul están montados en la parte móvil del domo y son alimentados por rieles electrificados (la flecha *115 VAC Supply* la representa), lo que esté por debajo permanece montado ya sea en la parte fija, en el piso del observatorio ó en el cuarto de control. Las características particulares se describen a continuación:

- Controlador principal y secundario de domo: El sistema de control de domo se compone de controladores modulares independientes. La instalación típica incluye un módulo para control de compuertas, un módulo de control de azimut y una interfase de comunicación con el PC de usuario. Esto permite la completa automatización de movimientos de domo, una calibración y configuración automáticas, previene al sistema en caso de falla en la PC de usuario, etc. Por lo general el microcontrolador posee un microprocesador embebido, y lo hace fácil de programar, debe poseer un estándar de comunicación como RS – 232. Cada

módulo posee una estructura basada en tres sub componentes: panel frontal, componentes externos y cableado. En el panel frontal aparecen elementos para que el usuario ejerza acciones de inicialización y control sobre el módulo como encendido, control de movimiento, de alarmas, funciones especiales. Dentro de los componentes externos se mencionan los sensores de posición, finales de carrera, motores para compuertas, respaldo de energía. En el cableado se incluyen toda la red de potencia (que alimenta a los motores) y de señal (en sensores e interfase de comunicación).

- Conjunto motor – variador de velocidad: Esta unión de sistemas permite mover la estructura con la misma suavidad y precisión que se logra al manipularla a mano. En caso de motores DC se facilita implementar un dispositivo variador de velocidad, en cambio para motor AC se requiere del circuito inversor adecuado para que responda a la dinámica del proceso. Cabe recordar el sistema se ayuda del reductor mecánico acoplado para no forzar el giro del motor.
- Finales de carrera, sensores e interruptores: Habilitan ó deshabilitan el movimiento de motores, activan ó desactivan actuadores tanto en giro de domo como en compuertas, proporcionan información instantánea de la posición ó azimut; en el caso específico de los finales de carrera permiten al controlador principal saber cuando una compuerta se ha abierto ó cerrado por completo pudiendo ser de tipo con contacto ó sin contacto, en los sensores el principal es el encoder acoplado a la parte móvil del domo y el cual entrega al controlador la posición de domo al girar, además de los de tipo atmosférico. Los interruptores son un tipo aparte de finales de carrera, que permiten establecer una posición inicial de referencia para la contabilización del azimut del domo, de preferencia tipo magnético, inductivo ó de efecto Hall.
- Módulo de entradas – salidas e interfase de comunicación: Acorde con la estructura modular del controlador y resto de dispositivos, existe un panel central donde confluyen los terminales de sensores, actuadores, cableado de señal y de potencia, e interfase de comunicación sea entre dichos dispositivos y el controlador ó entre controlador principal y secundario. Para ciertos enlaces se dispone de cable como medio físico y en muchos otros casos se aplica el enlace con tecnología inalámbrica.

- Fuente ininterrumpida de poder ó respaldo de energía: La razón principal de incorporar respaldo de este tipo es por seguridad, ya que actúa cuando existe un corte del suministro principal de energía para efectuar el cierre de compuertas y así evitar que el resto de dispositivos permanezca expuesto a los agentes externos que podrían ocasionar daños. Algunos observatorios poseen respaldo de energía para todo el sistema pero poseer este respaldo para los sistemas de emergencia es lo básico.
- 7PC de usuario para supervisión y control: Es el dispositivo más importante para el usuario, ya que ejecuta el programa principal de interfase de usuario, facilita la supervisión y control del sistema, todos los dispositivos descritos se incorporan a esta PC mediante los módulos e interfaces de comunicación y pueden “aparecer” al usuario como instrumentos virtuales dentro de la pantalla; podrá operarlos y conocer de su estado actual, configurará parámetros desde aquella pantalla, intercambiar entre modo automático ó manual, podrá incluso permitir el acceso del sistema a una red más amplia ó incluso a Internet para ejercer verdadero control remoto.

3.3.2. Especificaciones de software

Los dispositivos instalados en un observatorio automatizado son manejados por software de supervisión y control aplicado a la Astronomía, sus funciones guardan similitud con software de sistemas automatizados en otras ramas. Se pretende automatizar el control de domos motorizados para mantener la abertura del mismo sincronizada con el eje óptico del telescopio. El software debe computar el azimut y elevación de la abertura central para cualquier tipo de telescopio, ubicado en cualquier sitio dentro del domo. Cuando se utiliza en conjunto al software de automatización de telescopio, el domo seguirá automáticamente el movimiento del telescopio sin intervención humana. Existen paquetes de software para todas las funciones del observatorio y los desarrollan compañías de software como Software Bisque⁴⁸, la más reconocida. En el caso de operación automatizada de domos, cuenta con el paquete Automadome, existe otra compañía que tiene bastante aceptación y

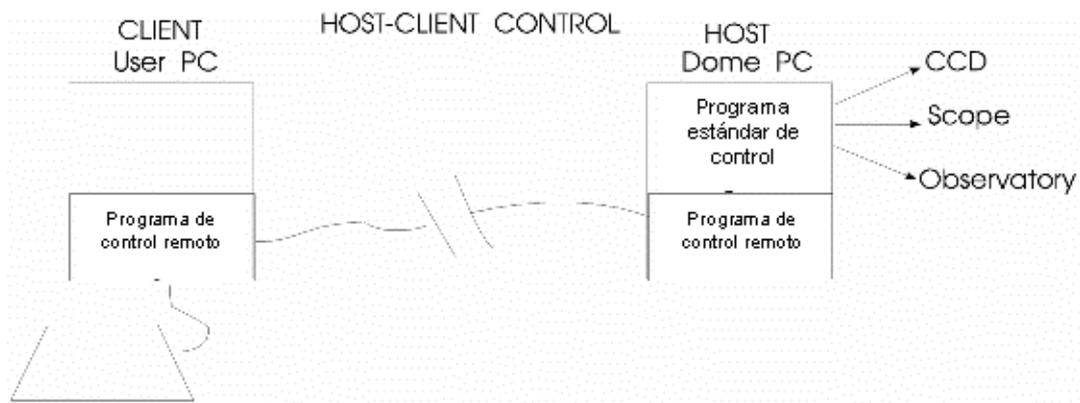
⁴⁸ <http://www.bisque.com/Products/Automadome/>

es Technical Innovations⁴⁹ con su paquete Digital Dome Works. Por supuesto ha surgido software desarrollado por los mismos operadores de observatorios pequeños y medianos y otros de código abierto, muchas veces preferido ya que se adapta a sus necesidades, y en parte por el alto precio de las licencias en los programas de las compañías de software.

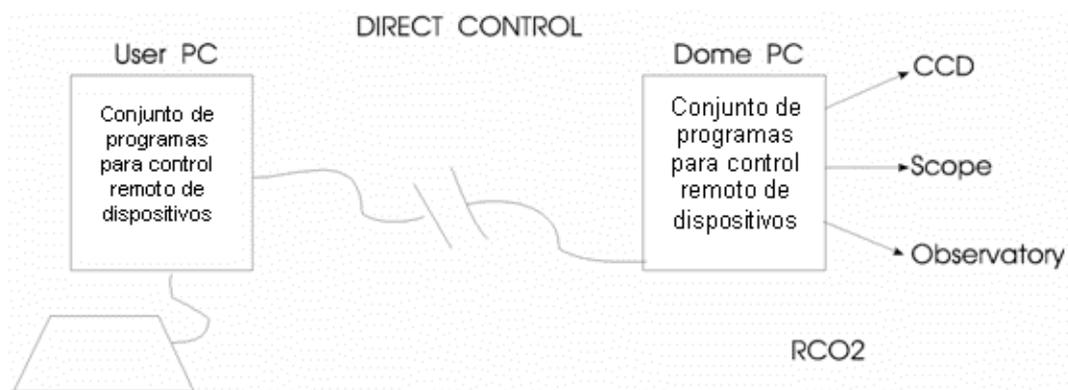
Se planea ejecutar el programa de control de dispositivos desde la PC instalada dentro del domo, y el usuario supervisar todo el sistema a través de aquella PC desde la PC de usuario. Sin embargo, este aspecto puede tener otra disposición. No es amplia la diferencia en decidir donde va a correr el programa de control, pero incidirá en el diseño y operación del sistema. Esta decisión podrá ampliar ó reducir el tipo de hardware y software a implementar. Existen dos maneras de manejar el programa de control para los dispositivos del observatorio:

- Instalar el programa de control en la PC de domo, entonces mediante software instalado en la PC de usuario tomar el control de la PC de domo de forma remota. Se denomina sistema cliente – servidor porque el “cliente” controla indirectamente a la PC de domo que actúa como “servidor”. Este sistema se ilustra en la figura 3.2a.
- El programa de control se instala en la PC de usuario, y simplemente poseerá un puerto de comunicaciones con la PC de domo que esta vez actúa como intermedio para comunicarse con cada dispositivo. La PC de domo debe contener software para determinar que dispositivo será activado para ejecución de comandos. Este tipo se denomina control directo, ya que las acciones de control las envía directamente el usuario desde su PC. Se ilustra en la figura 3.2b.

⁴⁹ <http://www.company7.com/techin/products/domespecs.html>



(a)



(b)

Fig 3.2. Formas de control sobre los observatorios: (a) Cliente – servidor; (b) Directo

Es recomendado y mayormente utilizado por los entendidos en automatización y operación de observatorios el tipo de control cliente – servidor, aunque cada sistema tiene ventajas y desventajas.

En el caso del tipo cliente – servidor, posee aspectos a favor:

- Puede ser utilizado con todo el hardware y software instalado.
- Es más flexible (pueden ejecutarse varios tipos de programas en la PC de domo).
- Se puede agregar nuevo hardware con nuevo software.
- Mejor soporte a servicios de red.

Hay que mencionar las desventajas de este tipo como:

- Respuesta más lenta hacia la PC de usuario.

El tipo de control directo posee ventajas como:

- Respuesta más rápida hacia la PC de usuario aún en enlaces de comunicación lentos.

Las desventajas de este tipo son:

- Todo el software de control instalado debe soportar un solo protocolo.
- Cierta hardware no soporta control directo.

3.4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Las condiciones geográficas y las prestaciones de cada observatorio reglamentan en cierto modo sus condiciones técnicas, en parte también por el tipo específico de observación a realizarse, sea en espectro visible, en el espectro infrarrojo, radiotelescopios, etc. Pero comparten las consideraciones generales para su funcionamiento automatizado como:

- Cobertura de cielo
- Precisión de apuntamiento hacia cierto astro
- Precisión de rastreo
- Error de offset
- Velocidad y aceleración de montura y domo
- Resolución de posición
- Límites de movimiento
- Control por computador, manual ó automático.

En el caso de nuestro estudio sólo ciertas de estas consideraciones tienen importancia, ya que el instrumental óptico es antiguo y es bastante complicado adecuarlo para que trabaje como un observatorio moderno. Se insiste en señalar que la automatización a llevar a cabo en el Observatorio de la Alameda es netamente enfocada hacia el movimiento mecánico de

la estructura. Entonces se establecerán y explicarán detalladamente modificaciones a considerarse como puntos básicos hacia el funcionamiento automatizado de este observatorio.

3.4.1. Establecimiento de posiciones iniciales en domo, montura y compuertas⁵⁰

El establecimiento en un observatorio de la posición inicial de domo, sus compuertas, así como la del telescopio residen en la disposición del hardware dentro del mismo, el movimiento a ser controlado por los dispositivos dedicados a ese propósito se basan en software que debe ceñirse a la geometría de domo ya que no todos los observatorios tienen siempre el mismo tipo de montura y telescopio y no se ubican en la misma posición dentro del domo. Los parámetros de geometría asociada domo – montura para el Observatorio Astronómico de la Alameda son:

- Polo norte celestial (elevación del eje polar): $0^{\circ} 12' 53.7''$ Sur
- Radio de domo: 3.354 metros
- Altura base de observatorio: 12m
- Distancia entre montura y domo: $X_m = 0m$, $Y_m = 0.55m$ sur, $Z_m = 3.9m$
- Distancia entre telescopio y montura: $X_t = 0.5m$, $Y_t = 0.2m$
- Distancia entre eje óptico y telescopio: $Y_0 = 0m$
- Punto de intersección de ejes (punto de referencia centro de domo): -0.55m en “x”, 0m en “y”, 2.5m en “z”
- Abertura central de domo: 0.82m
- Diámetro de lente principal: 0.24m

Dados los parámetros que servirán para el software de los dispositivos de control, se deben definir los puntos clave de referencia para el movimiento de la estructura, principalmente del domo. Por norma en los catálogos de estrellas y cuerpos celestes y de manera lógica, se estipula como origen de coordenada de azimut de domo al punto Norte del mismo, y con el avance de azimut positivo entre 0° y 359° en el sentido de las manecillas del reloj. La

⁵⁰ http://www.bisque.com/help/automadome/Getting_Started.htm

posición cero utiliza un interruptor magnético instalado en la parte móvil del domo, lo más cercano al piso del observatorio ó a la parte fija (home switch), sus terminales se conectan a una de las entradas digitales del controlador principal de domo. En la parte fija ó en el piso se ubica un magneto (home magnet) el cual provocará el cierre del interruptor magnético cuando pase por él, ésta es la posición cero descrita; el controlador detectará el cierre del contacto, inicializará en cero el azimut de domo y de continuar el desplazamiento lo contabilizará como positivo ó negativo según el sentido. La figura 3.3 muestra la ubicación de la posición 0° del azimut del domo respecto a los puntos cardinales.

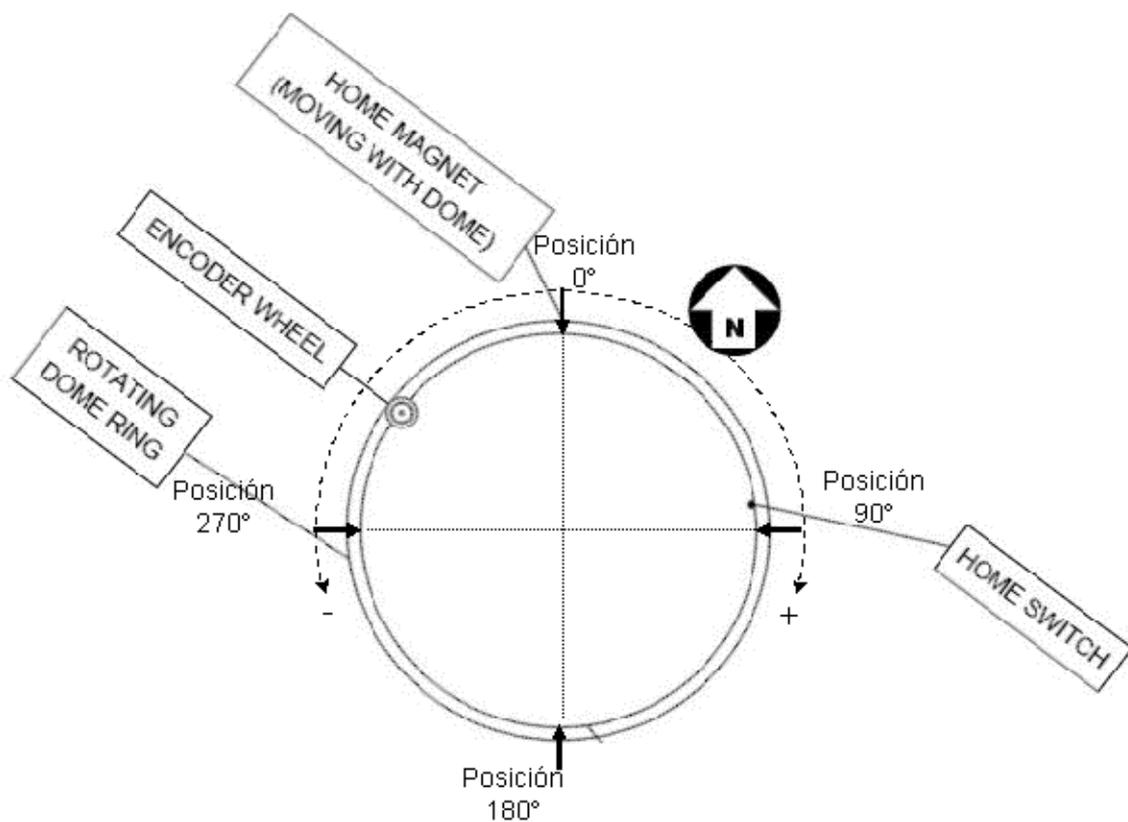


Fig 3.3. Establecimiento de posición inicial para azimut de domo

Nótese que la gráfica anterior incluye la posición de la rueda de encoder (encoder wheel), la cual es también sujeta a una ubicación específica, como el encoder realiza simplemente el conteo de pulsos a medida que gira la estructura (se monta en la parte móvil y la rueda hace contacto con la riel de domo) y se tiene la posición inicial demarcada por el magneto, no existe problema de ubicarlo en un sitio distinto al de la posición cero. Se prefiere la ubicación del encoder en la misma que cuando el magneto en el piso del observatorio

cierra el interruptor magnético (es decir en la posición 0°) mientras lo permita el espacio físico disponible en esa área.

En algunos casos la posición cero es la misma que la posición denominada de parqueo, es decir a la posición que regresan tanto telescopio como domo terminada la sesión de observación. Para el caso del telescopio se recomienda una posición de parqueo con el lente principal apuntando hacia el punto Norte del observatorio, esto en el eje de declinación, y con el eje de ascensión recta dispuesto de tal forma que el eje de declinación esté perpendicular al suelo. En el domo se recomienda establecer su posición de parqueo en la posición cero. La fotografía del telescopio ecuatorial Merz del Observatorio de la Alameda de la figura 3.4 muestra aquella descripción.

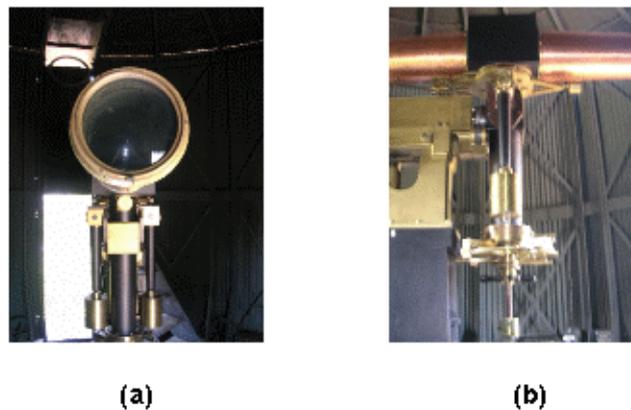


Fig 3.4. (a) El lente principal apuntando hacia el Norte; (b) El eje de declinación es perpendicular al suelo de observatorio

La montura tan sólo necesita especificar los límites de movimiento en cada eje, por ejemplo en el caso del Observatorio de la Alameda el eje de ascensión recta hace que el tubo del telescopio eventualmente choque contra la montura por eso la limitación de movimiento en aquel eje, el eje de declinación no presenta problema. En el esquema gráfico de la figura 3.5 se explica la limitación de movimiento en el eje de ascensión recta.

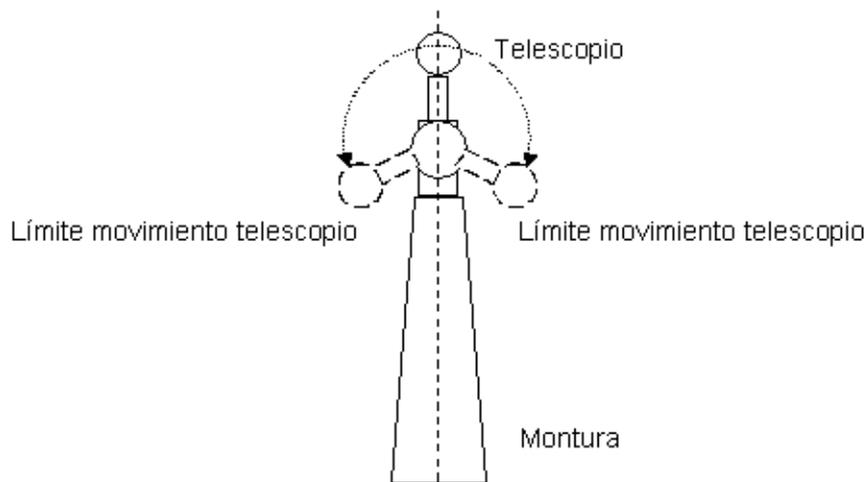


Fig 3.5. Límite de movimiento de telescopio respecto a montura en el eje de ascensión recta

Las compuertas de domo tanto laterales como superiores deben estar completamente cerradas inicialmente, para que en el comienzo de sesión de observación sean abiertas por los actuadores destinados para aquellas. Deben instalarse switches límite en los bordes de las compuertas para que envíen señal al controlador de compuertas de que están cerradas. De idéntica manera se implementarán switches límite en cierta ubicación del domo para enviar señal de apertura completa de compuertas, lo cual permitirá a los actuadores parar los motores que mueven el mecanismo de movimiento de compuertas. La abertura central de domo permite la observación abriendo las dos compuertas superiores y las dos laterales, sin embargo para efecto de optimización de recursos puede desarrollarse una observación sin problemas abriendo sólo la mitad de las compuertas: una lateral y una superior contigua. Sin embargo una de las compuertas superiores al cerrar ambas se superpone a la otra, así que se debe escoger la compuerta superior que quede por encima y de ahí determinar la compuerta lateral contigua. El ángulo de apertura en las compuertas superiores alcanza aproximadamente 90° , las laterales se abren a 180° siendo suficiente en ambos casos una apertura de 90° . En la fotografía de la figura 3.6. se visualizan las compuertas superiores y laterales.



(a)



(b)

Fig 3.6. (a) Vista interior de las compuertas superiores del domo; (b) Vista exterior de una de las compuertas laterales

3.4.2. Fases de una sesión de observación automatizada⁵¹

Durante una típica sesión de observación automatizada, todo el sistema trabajará en forma autónoma e independiente, sin presencia del operador. Asumiendo que el telescopio ya está correctamente alineado y con sus parámetros de ubicación establecidos, las fases que se siguen en orden para el inicio de una sesión de observación son:

1. Encendido e inicialización del PC de usuario, y si se dispone, también del computador de domo.
2. Encendido del módulo de control de domo y telescopio.
3. Establecimiento de comunicación entre PC de usuario, computador de domo y controlador principal.
4. Rutina de verificación del sistema (domo y telescopio en posiciones de parqueo, compuertas cerradas, lectura inicial de sensores, puesta en cero de coordenadas, etc.).
5. Arranque de software de control en PC de usuario y de domo.
6. Encendido de dispositivos de potencia de domo y telescopio.
7. Estado de espera del software de control (para receptar comandos).

⁵¹ http://omegagroup.altervista.org/relazioneing_dho.htm

Una vez que el sistema se encuentra listo para empezar a ejecutar los comandos del operador ya sea digitando uno por uno ó mediante lista de comandos, se continúan enumerando las fases de la sesión:

8. Ingreso del comando.
9. Procesamiento y ejecución del comando.
10. Lectura continua de sensores durante la ejecución del comando.
11. Culminación del comando al llegar a la posición deseada.

Luego de ejecutar todos los comandos del operador ó cuando expire el tiempo límite de sesión la misma se concluye con las siguientes fases:

12. Apagado de dispositivos de imagen del telescopio.
13. Dirigir el telescopio hacia su posición de parqueo.
14. Cierre de compuertas en domo.
15. Parqueo de domo.
16. Apagado de dispositivos de potencia.
17. Terminar enlace de comunicaciones entre telescopio y domo.
18. Terminar enlace de comunicaciones entre observatorio y PC de usuario.
19. Finalización de programa de control
20. Apagado general.

3.4.3. Conversión entre coordenadas ecuatoriales a coordenadas alt – azimutales

Como se estipuló en el capítulo 1, las coordenadas celestiales de un astro y el tiempo sideral local sirven para localizarlo en el horizonte y apuntarlo con el telescopio; los cuerpos celestes poseen ascensión recta y declinación constantes no dependen del tiempo, pero por causa del movimiento de rotación de la Tierra su ubicación en el horizonte del observador varía respecto al tiempo. El ángulo horario y el tiempo sideral local corren en unidades de tiempo, tienen los mismos límites pero se contrarrestan, por eso la ascensión recta resulta constante para cada astro. Entonces las coordenadas de horizonte de un astro varían respecto al tiempo.

Para la obtención final de la coordenada de azimut de un astro y aplicarla a posicionar la abertura central del domo se siguen algunas fórmulas y conceptos previos⁵² que, aún siendo de moderada precisión, son básicos para la localización de objetos en la esfera celeste (no toman en cuenta fenómenos como la precesión y la nutación terrestres). Mediante pasos se puede explicar la obtención de las coordenadas de altitud y azimut del astro:

- Hallar fecha juliana (JD): Es un número de días contados en el calendario juliano, una progresión continua de años para evitar la utilización del calendario gregoriano (años antes de Cristo y después de Cristo). Mediante la fórmula 3.1, toma en cuenta el año civil común y corriente (2008 por ejemplo), el número del mes de ese año y el número de día de ese mes. Para efectos de cálculo, existe la restricción de que si el número de mes es menor ó igual a 2, el número de año se cambia a (numero de año - 1) y en el mes, (numero de mes + 12), de lo contrario no se alteran.

$$JD = Int(365.25 * (\#Año + 4716)) + Int(30.6001 * (\#Mes + 1)) + \#Dia + \left(2 - Int\left(\frac{\#Año}{100}\right) + Int\left(\frac{Int\left(\frac{\#Año}{100}\right)}{4}\right) - 15245 \right) \quad (3.1)$$

; Int = Parte entera de

- Tiempo sideral de Greenwich: Es la hora sideral local en el meridiano terrestre cero. Utiliza para su cálculo al tiempo universal (UT por sus siglas en inglés), no es más que sumar a la hora local la diferencia horaria con Greenwich, además utiliza el día juliano. La ecuación 3.2 establece el tiempo sideral de Greenwich (GST):

$$GST = 6.6460656 + \left(\frac{24000512617 * (JD - 2415020)}{36525} \right) + 1.002737908 * UT \quad (3.2)$$

⁵² <http://www.stargazing.net/kepler/altaz.html>

- Tiempo sideral local (*LST*): Es la base horaria para la observación astronómica, con este “reloj” se puede conocer a que hora aparecerá y ocultará un astro en el horizonte y su trayectoria durante la misma. Para lograr una considerable precisión y teniendo calculado el GST, le suma la longitud geográfica del sitio de observación dividido para 15 (así convierte grados, minutos y segundos en horas, minutos y segundos), signo positivo si está al Este de Greenwich, signo negativo si está al Oeste. Se expresa en la fórmula 3.3.

$$LST = GST + \left(\frac{Longitud}{15} \right) \quad (3.3)$$

- Angulo horario (*HA*): Es la distancia angular medida en horas, minutos y segundos de un astro hacia el punto de equinoccio vernal. Como se mencionó, el ángulo horario y el tiempo sideral corren contrapuestos, ya que la ascensión recta se mide positiva hacia el este y el ángulo horario lo hace positivo hacia el Oeste de aquel punto. La ecuación 3.4. se despeja de la ecuación 1.15.

$$HA = LST - RA \quad (3.4)$$

Con la obtención del ángulo horario, junto a la latitud geográfica del sitio de observación es posible convertir las coordenadas de ascensión recta (*RA*) y declinación (*DEC*) en altitud (*ALT*) y azimut (*AZ*). Internamente habrán de convertirse grados sexagesimales a grados decimales para el cálculo en ángulo horario, declinación y latitud. Las ecuaciones que definen la altitud y el azimut instantáneo de un astro se expresan en las ecuaciones 3.5 y 3.6 respectivamente.

$$ALT = \arcsen(Sen(Latitud) * Sen(DEC) + Cos(Latitud) * Cos(DEC) * Cos(HA)) \quad (3.5)$$

$$AZ = \arctan\left(\frac{- Sen(HA) * Cos(DEC)}{Cos(Latitud) * Sen(DEC) - Sen(Latitud) * Cos(DEC) * Cos(HA)} \right) \quad (3.6)$$

En la ecuación 3.6, la fórmula esta dispuesta para que el azimut se contabilice como positivo partiendo desde el punto Norte en el sentido de las manecillas del reloj, tal como se lo estandarizó en las posiciones iniciales de domo; el resultado instantáneo que arroje esta ecuación determinará el movimiento de la abertura central de domo. La ecuación de altitud sirve para conocer con anticipación a que instante de tiempo va a aparecer y ocultarse en el horizonte cierto astro a ser observado.

3.4.4. Corrección de excentricidad respecto al eje de rotación de la montura

Debido a los parámetros geométricos de domo y de montura es imperioso conocer el desfase ó desencuadre que tienen los distintos ejes de movimiento: el eje de ascensión recta respecto al eje de declinación, y el eje de declinación respecto al eje de giro de domo. En el primer caso ambos pertenecen a la montura, tienen libertad e independencia de movimiento, se intersecan mecánicamente en un punto y están perfectamente balanceados. Para el segundo caso, el eje de declinación como se explicó en el capítulo 1, va a tener relación directa con el azimut de la abertura central de domo; el punto central imaginario alrededor del cual gira el domo está precisamente en el centro de la montura, pero el punto central de giro del eje de declinación está desplazado 55 centímetros al sur del punto donde coincidiría con el eje de giro de domo. Por esto, si se los hace girar a una misma velocidad no van a coincidir en la mayoría de posiciones de azimut el eje óptico del telescopio y la abertura de domo, lo que incide en ocultación de la visibilidad para el telescopio por grande que sea la abertura central en relación al diámetro del lente principal. Un bosquejo muy simple de la excentricidad del eje de declinación se muestra en la figura 3.7.

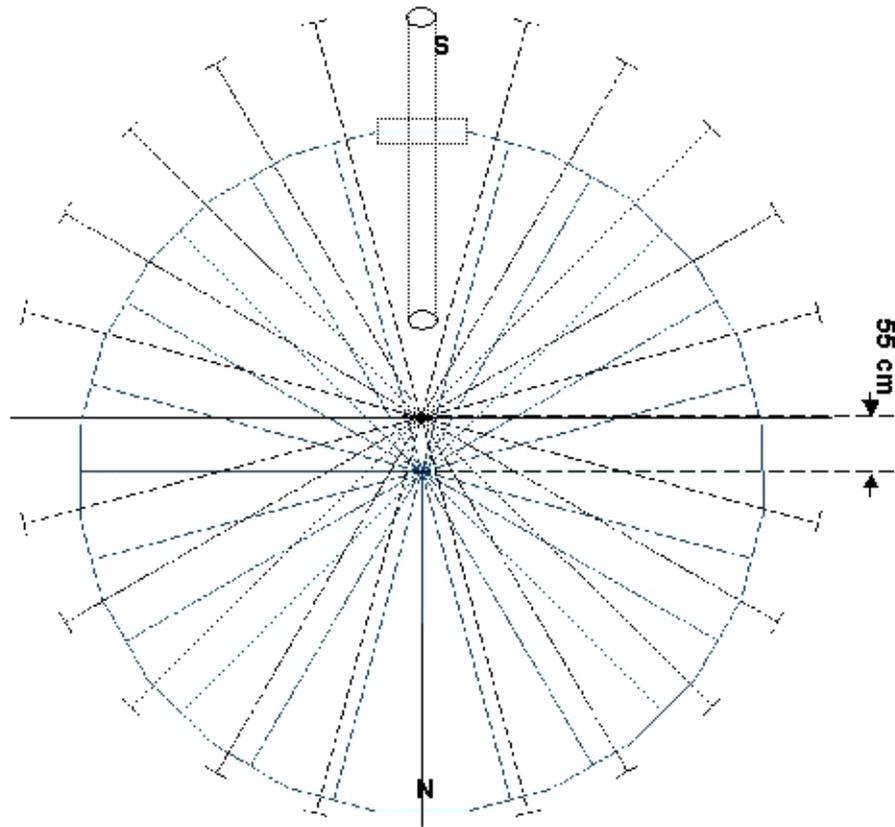


Fig 3.7. Excentricidad en eje de declinación y distancia al eje de giro de domo

El esquema de la figura anterior hace notar la distancia entre los ejes de declinación y de giro de domo. Las líneas más largas que sobresalen de la circunferencia representan la posición instantánea del eje óptico del telescopio, incorporan un segmento en sus extremos que representa el diámetro del lente principal. La circunferencia no es más que la posición instantánea de la abertura de domo resaltada con un pequeño rectángulo para compararla con el diámetro del lente. Si el tubo del telescopio inicia su movimiento desde la posición Sur, la abertura de domo no obstruye su visibilidad pero a medida que el telescopio avanza hacia el Este ú Oeste da la impresión que la abertura de domo se encuentra adelantada; sin embargo al llegar a la posición Norte el eje óptico y el de abertura de domo vuelven a alinearse. Debe encontrarse una forma no lineal de velocidad de movimiento para la perfecta disposición de los ejes mencionados. Para tratar esta desigualdad teóricamente se tienen dos opciones:

- Convertir en no lineal el movimiento del eje de declinación.
- Convertir en no lineal el movimiento del eje de giro de domo.

Si de manera práctica se trata, la primera opción no es recomendable, ya que se debería realizar primero una conversión de la coordenada normal de azimut de un astro a su equivalente en el sistema no lineal de movimiento, además que este eje en el caso del Observatorio de la Alameda no es motorizado y se lo gira a mano, lo que le restaría precisión. La segunda es la recomendada, porque así no altera la velocidad de movimiento del eje de declinación y dependerá del controlador de domo la conversión de velocidad de movimiento a no lineal, lo cual asegura una alta precisión. Esto dependerá también de las características del encoder acoplado al sistema.

Una mejor explicación del cambio de velocidad que sufre el giro del domo se muestra con un ejemplo en la figura 3.8. Asumir eje de declinación (velocidad a la que gira el eje óptico) a $15^\circ/\text{seg}$. constantes, luego para ciertos intervalos de giro de la abertura de domo se asignarán velocidades distintas con el fin de que el campo de visión del telescopio no sea ocultado por el domo, asumir giro en contra de las manecillas del reloj desde el punto Sur:

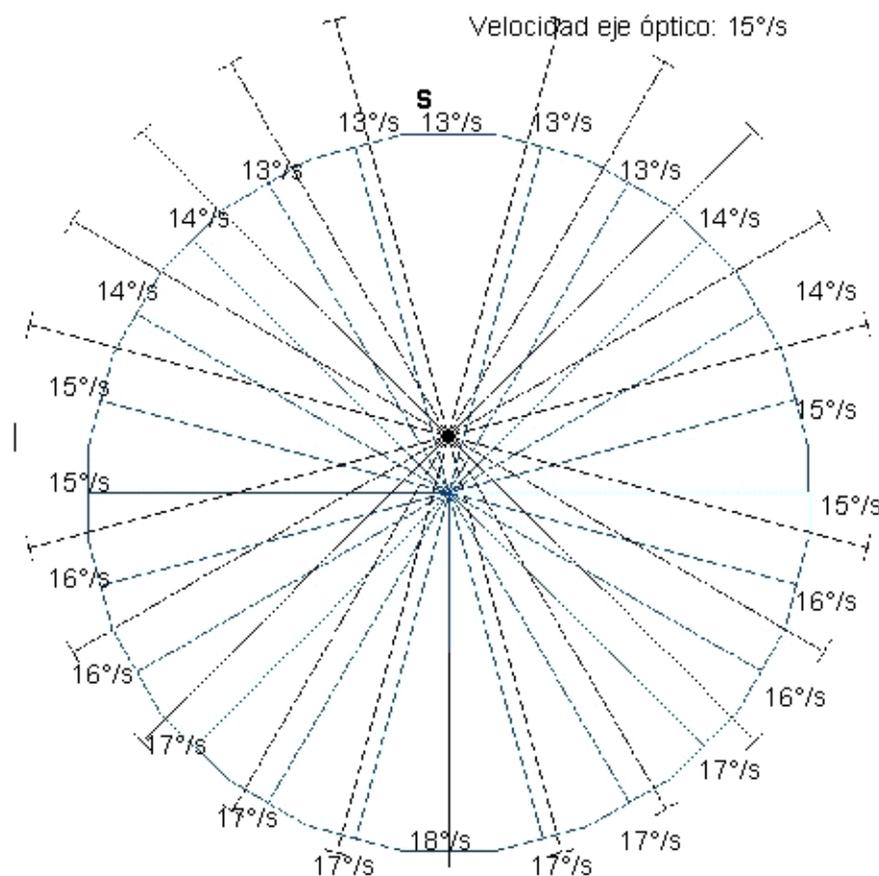


Fig 3.8. Razón de cambio de velocidad en tramos de giro de domo

Esta es una interpretación aproximada de la corrección de velocidad en domo para seguir la velocidad lineal del eje de declinación; en la figura 3.9 se ilustra tanto el giro a velocidad constante del tubo del telescopio a 24 intervalos iguales, con la equivalencia de giro de esos intervalos en grados del domo. La suma en grados de todos los intervalos es 359.8°, tiene una aproximación muy cercana. El comportamiento del azimut de domo en grados respecto al ángulo de giro del eje de declinación en grados se muestra en la gráfica de Excel de la figura 3.10.

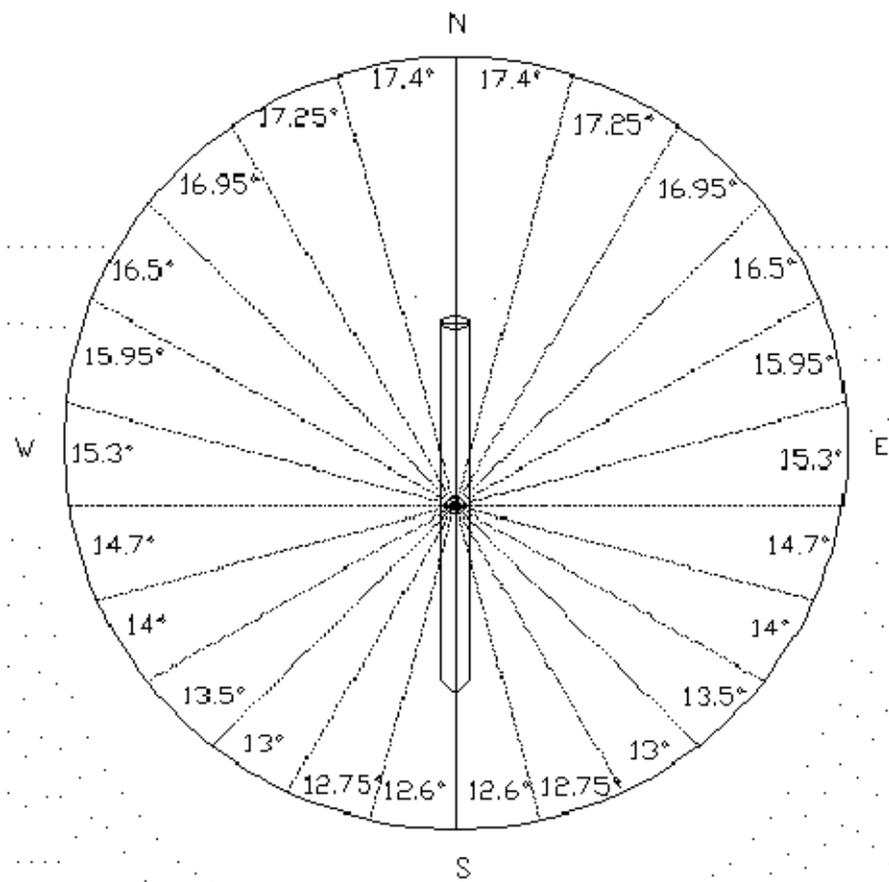


Fig 3.9. Representación del tubo del telescopio apuntando hacia el centro de la apertura de domo, equivalencia de giro en domo

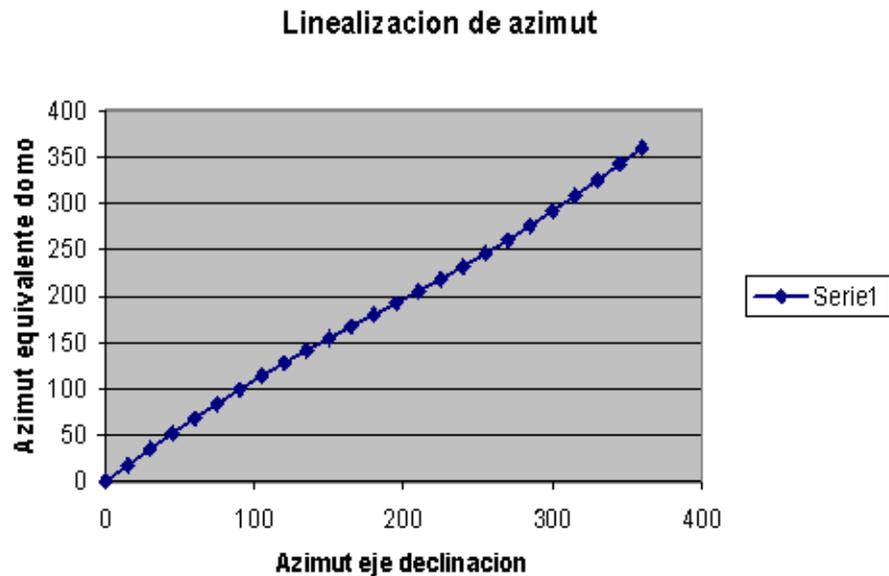


Fig 3.10. Correspondencia de azimut de eje de declinación a azimut de domo

3.5. PARÁMETROS FÍSICOS DE LA ESTRUCTURA DE DOMO

En este subcapítulo se muestran los diferentes parámetros estructurales básicos del domo del Observatorio Astronómico de la Alameda en la actualidad.

3.5.1. Descripción de la estructura de domo

El domo ó cúpula del Observatorio está construido en un gran porcentaje de metal (hierro y zinc) y con pocos elementos en madera, tiene la forma de un cilindro en su base y termina en forma de cono en su techo, existen doce pares de vigas que se extienden por todo el espacio cilíndrico de la pared asentados sobre una especie de anillo grueso. Existen otros dos pares de anillos más delgados acoplados hechos a base de ángulo en la parte media y superior de las vigas. Cruzados de manera diagonal entre un par y otro de vigas están acoplados dos contravientos o crucetas, tanto en la mitad inferior como superior de las vigas para darle estabilidad a toda la estructura. Existen 12 ruedas de brazos radiales con brida instaladas en el anillo grueso inferior, situadas en la base de cada par de vigas. Cubriendo a toda la estructura de vigas y anillos se encuentran láminas metálicas onduladas, muy parecidas a las planchas de zinc actuales. La pared cilíndrica se interrumpe por dos compuertas laterales que dan paso a una apertura central. Junto a una

de las compuertas lado derecho se encuentra el mecanismo de manivela acoplado a una de las ruedas para generar el movimiento de la estructura. Junto a la compuerta diametralmente opuesta a la anterior se tiene una escalera acoplada a un par de vigas para acceso al techo. Desplazados tres pares de vigas a la izquierda de las compuertas se encuentran dos tornillos sin fin acoplados a un cable de acero, que mediante manivela se encargan de la apertura ó cierre de compuertas superiores. El techo está dispuesto de forma cónica, su soporte principal es una “red” de rieles con asidero en el anillo superior de las vigas, con dos rieles paralelos que cruzan justo sobre la abertura central y que también le dan soporte. Esta red de rieles excepto los rieles paralelos está cubierta por planchas de hierro de 3 mm. de espesor que en volado sobrepasan al menos 60 cm. al nivel de las planchas de zinc de la pared cilíndrica. Sobre los rieles paralelos centrales yacen las compuertas superiores, que son accionadas por el mecanismo de manivela del interior de cúpula y ayudado en el techo por poleas instaladas junto a cada compuerta superior (el cable de acero que viene de abajo se asegura de tal manera que se levante la compuerta al halar del cable). Todo lo anteriormente descrito reposa sobre un riel circular en la base del observatorio, las 12 ruedas se acoplan al mismo para resistir el peso total y brindarle libertad de giro. El resto del material de acople es de madera, incluyendo alfajías, vigas y listones.

En el Anexo A se encuentra el levantamiento gráfico (plano estructural) del domo del Observatorio. Conjuntamente, en el Anexo B se encuentra el cálculo de volúmenes de la estructura, realizado y avalizado por el Arq. Germán Hidalgo. Las fotografías que ilustran partes de la estructura real, tal como se la ha descrito se encuentran en el Anexo C.

3.5.2. Establecimiento de parámetros físicos óptimos de operación

Para la construcción de cualquier tipo de domo para observatorio, se precisan los elementos estructurales básicos⁵³ para su funcionamiento:

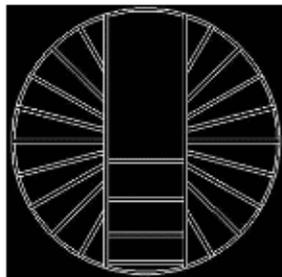
- Esqueleto ó armazón.
- Compuertas

⁵³ <http://www.fortunecity.es/arcoiris/tarot/572/observatorio.html>

- Sistema de rotación
- Cubierta

Con el ensamble, acabado de estos elementos básicos y puesta en funcionamiento del domo es que se puede derivar la optimización para el observatorio.

El esqueleto ó armazón da la forma del espacio interior del que dispondrá el domo cuando esté terminado, además que la razón obvia es dar soporte al resto de la estructura. Un ejemplo de armazón se muestra en la figura 3.11.



(a)



(b)

Fig 3.11. (a) Esquemático del armazón; (b) Armazón real de un domo

Las compuertas permiten al telescopio la observación y protegiéndolo de agentes externos, se abren y cierran según se requiera. Cuando están abiertas disponen la abertura central, uno de los parámetros más significativos del domo dentro de un observatorio. Un ejemplo de compuerta deslizante se muestra en la figura 3.12.

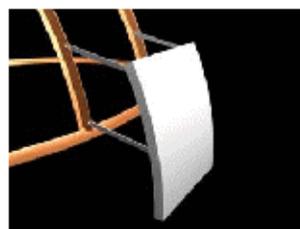


Fig 3.12. Compuerta deslizante.

El sistema de rotación involucra tanto a la parte fija del domo como a la móvil, ya que la segunda depende que la primera sea firme y suave para el movimiento giratorio

acoplándose de manera casi perfecta. El componente básico de parte fija y parte móvil se muestran en la figura 3.13.

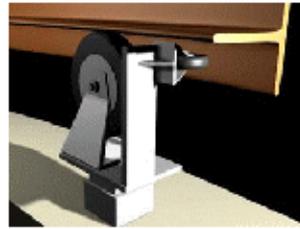


Fig. 3.13. Sistema de rotación

La cubierta “forra” a todo el domo excepto en las compuertas, tapa el paso de la luz, lluvia, humedad, viento y demás agentes externos, pueden ser paneles de diferentes materiales, robustos y resistentes a la corrosión, que están acopladas al armazón. Se muestra en la figura 3.14 un ejemplo de cubierta de domo hecho en aluminio.



Fig 3.14. Cubierta de domo

Existen especificaciones físicas y de dinámica de domo respecto a varios ítems, pero se pueden interpretar resumidamente las más importantes en los siguientes puntos:

- Diámetro de domo
- Peso móvil del domo
- Ancho y máxima altitud de abertura central
- Altura de domo en su centro
- Número de ruedas acopladas en la parte móvil
- Reducción mecánica del elemento generador de giro
- Momento de inercia
- Coeficiente de rozamiento

Las recomendaciones en pos de lograr el óptimo rendimiento dinámico de la estructura son detalladas a continuación:

- En el armazón del domo no se tienen mayores problemas, tan sólo verificar si alguna junta ó acople se encuentra floja ó desgastada y reparar el daño para que no peligre la estabilidad de la estructura al incorporar las futuras modificaciones para la automatización.
- La apertura y cierre de compuertas superiores y laterales no tiene inconveniente, pero existen dos desavenencias por superar: primero, la oxidación y notable desgaste de poleas, cables, manivelas y goznes, segundo adecuar sistemas apropiados para el accionamiento automático de las compuertas, la recomendación en este segundo punto es instalar cilindros neumáticos para las compuertas laterales y motor eléctrico con reductor mecánico para el mecanismo de las compuertas superiores. El ancho de apertura central está dentro de lo recomendado para observatorios (mas de 3 veces el diámetro de la lente principal del telescopio), y recorre todo el centro del domo con lo que abriendo todas las compuertas el domo aparece como partido por la mitad. La disposición del telescopio permite optimizar la instalación de apertura y cierre automáticos de compuertas a una sola compuerta lateral y una sola compuerta superior, en tanto que sean contiguas para que la abertura central se reduzca en su largo a la mitad y no obstruirá al telescopio.
- En el sistema de rotación, cabe señalar por leyes de Newton que la fuerza de fricción es directamente proporcional a la presión entre las superficies en contacto, que la fricción es independiente de la longitud de contacto de las superficies y que es independiente de la velocidad de deslizamiento. Las ruedas acopladas a la parte móvil reparten por igual el peso del domo, son equidistantes una de otra, reposan sobre un riel uniforme y están hechas todas de la misma forma, así que la resistencia al deslizamiento es independiente del número de ruedas. La parte mecánica debe inspeccionarse para evitar que se altere el equilibrio del sistema de rotación (puede darse el caso de que una ó varias ruedas patine con la consecuencia de recargar peso en las otras ruedas y restándole facilidad de giro). El mecanismo generador de giro también se apega a la revisión mecánica para posteriormente determinar el tipo y razón de reducción del reductor mecánico a adaptarse para su

funcionamiento a motor eléctrico (se recomienda un motor AC de inducción de al menos 1HP y una razón de reducción mecánica del reductor a acoplar de mínimo 30:1). Además es necesario instalar el dispositivo sensor de posición en este elemento y proporcionará la posición instantánea del giro del domo al acoplar la rueda del sensor al riel. Dispositivos del sistema de control como el controlador de domo, manejador de potencia, motores, respaldo de energía, finales de carrera irán acoplados convenientemente sea en el mecanismo de manivela del domo ó en las vigas del armazón.

- En cubierta se deben tapar fisuras si existen y son de consideración, además que servirá para adecuar cualquier tipo de sensor ó dispositivo adicional externo (ejemplo en el techo deben instalarse los sensores atmosféricos).

3.6. DISEÑO DE CONTROL ⁵⁴

La operación automatizada de domo reside en un sistema de control gobernado por un controlador analógico ó digital, el cual ejecuta un “script” que manejará todos los comandos básicos y avanzados de domo. Estas funciones del controlador pueden adaptarse al control y habilitarse en cualquier interfase de control de domo.

El control ejercido sobre un domo automatizado manipulará todos los aspecto funcionales del mismo como rotación (el más importante), accionamiento de compuertas, “slaving” (sincronización del movimiento del telescopio con el del domo), entre otros. Asimismo, la interfase de usuario dentro de la automatización debe permitir los tipos de operación local ó remota, manejo cliente – servidor ó manejo directo, modo de operación automatizado ó manual. De aquí surgen los procesos típicos en automatización aplicados a la astronomía, ahora nuestro observatorio y más precisamente el domo del mismo pasa a analizarse como un sistema con varios procesos en el que se deben controlar variables como posición y velocidad angular, temperatura, humedad, pluviosidad.

⁵⁴ http://observa-dome.com/pdf/Automation_Solutions.pdf

3.6.1. Modelado del sistema

Siguiendo los pasos de diseño descritos en el capítulo II se obtiene:

1. Adaptación de sistema real a sistema físico: Esbozando un concepto generalizado, según los requerimientos del sistema, el diagrama de la figura 3.15 muestra todos los aspectos que se necesitan para el control de las distintas variables, principalmente de la posición angular del domo.

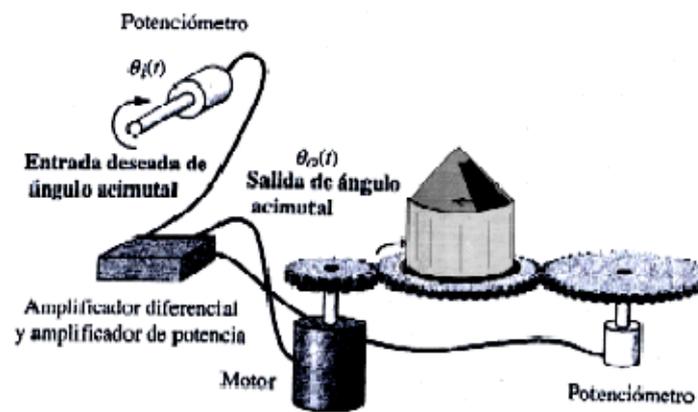


Fig 3.15. Concepto de sistema de posición angular de domo

2. Diagrama de bloques funcional: Se toma en cuenta sólo el funcionamiento básico de cada bloque y sus interacciones con otros bloques, se muestra en la figura 3.16.

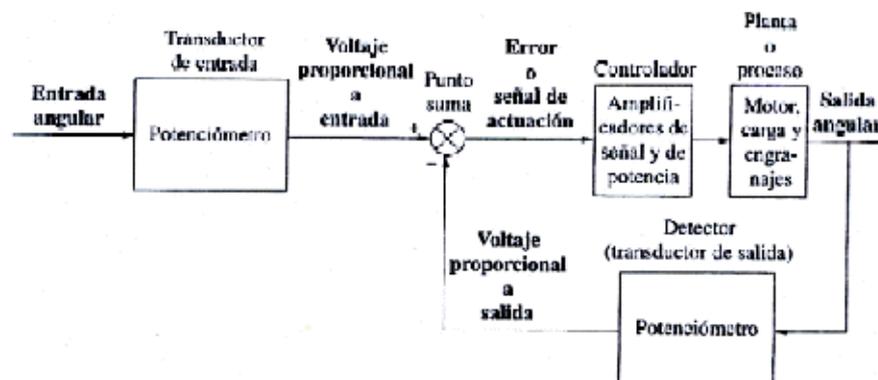


Fig 3.16. Diagrama de bloques funcional

- Diagrama esquemático: El paso previo al verdadero análisis de sistemas de control, partiendo de suposiciones previas de parámetros que se considere afectarán directamente al comportamiento del todo. Al agregar cada parámetro el sistema se volverá complejo, aún tratándose básicamente de un proceso de control de posición angular. Como suposiciones previas se determinaron la despreciable acción del viento en la estructura de domo, idealmente no existirá deslizamiento ó “patinaje” de las ruedas sobre el riel, el peso de la estructura se encuentra repartido por igual a cada rueda, en los reductores mecánicos será despreciable su rozamiento. Se puede expresar de manera empírica un diagrama esquemático en la figura 3.17.

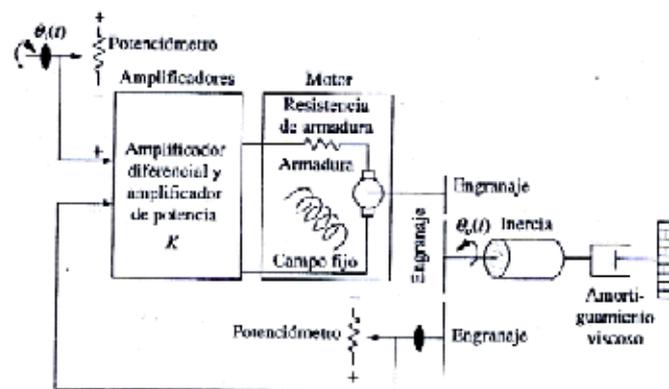


Fig 3.17. Diagrama esquemático

- Modelo matemático: Simplemente se considerarán a los diversos elementos físicos con su comportamiento, con la inclusión de ecuaciones que describan la relación entrada – salida. Se insertan funciones matemáticas a cada bloque esquemático, dependiendo del método para hallarlas. Se toman en cuenta ahora parámetros como masa de traslación, inercia de rotación, fricción viscosa, amortiguamiento viscoso, ecuaciones de movimiento, ecuaciones de fuerza, momento angular, centro de masa, etc. La ayuda de herramientas de software agilizan significativamente la obtención de dichas funciones individuales con alta precisión.
- Reducir diagrama de bloques: Obtenido ya un modelo para el control a partir del modelo general, los distintos bloques con sus funciones particulares se concatenan hacia un solo bloque equivalente.

6. Evaluación del sistema: Nuestra función de transferencia se somete a los diferentes análisis de sistemas de control para obtener la respuesta más cercana a la ideal, métodos descritos en el capítulo II. Como paso final se tiene decidir y configurar el tipo de control a implementarse en el sistema.

3.6.2. Función de transferencia del sistema

En la obtención de esta función se incluyen todos los sistemas eléctricos y mecánicos relacionados. Cada subsistema se representa como un bloque; y los pasos para establecer dichas interacciones entre subsistemas se detallan a continuación:

- Primera etapa: Entrada consigna de azimut (setpoint); salida voltaje proporcional a azimut.

$$\text{Bloque1} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Voltaje proporcional a ángulo}}{\text{Ángulo deseado}}$$

- Segunda etapa: Entrada voltaje proporcional a ángulo; salida K*voltaje proporcional a ángulo.

$$\text{Bloque2} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{K * \text{Voltaje proporcional a ángulo}}{\text{Voltaje proporcional a ángulo}}$$

- Tercera etapa: Entrada K*voltaje proporcional a ángulo; salida voltaje de alimentación a motor.

$$\text{Bloque3} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Voltaje motor}}{K * \text{Voltaje proporcional a ángulo}}$$

- Cuarta etapa: Entrada voltaje de alimentación a motor; salida ángulo de rotación de eje.

$$\text{Bloque 4} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Ángulo de rotación eje}}{\text{Voltaje motor}}$$

- Quinta etapa: Entrada ángulo de rotación de eje, salida ángulo de rotación de rueda.

$$\text{Bloque 5} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Ángulo rueda}}{\text{Ángulo Eje}}$$

- Sexta etapa: Entrada desplazamiento angular de rueda; salida ángulo de rotación de domo (variable controlada).

$$\text{Bloque 6} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \frac{\text{Ángulo Domo}}{\text{Ángulo Rueda}}$$

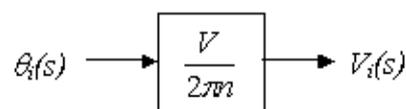
Esto resulta en la relación final entre la primera entrada y la última salida sumando todas las etapas:

$$\text{Func. Transf} = \frac{\text{Ángulo Domo}}{\text{Ángulo deseado}}$$

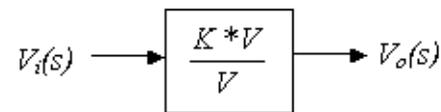
3.6.3. Diagrama de bloques del sistema de control

Retomando los bloques determinados, ahora se generaliza una ecuación característica para cada uno; insertando los parámetros físicos en ellos.

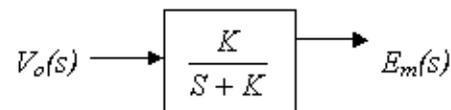
- Primera etapa: Relaciona el setpoint de ángulo con el voltaje de salida proporcional mediante potenciómetro.



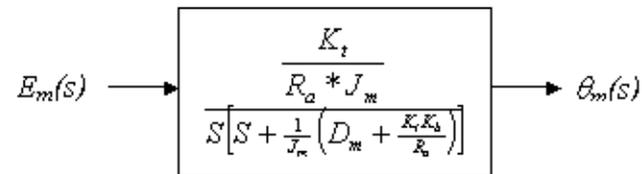
- Segunda etapa: Amplificador de señal, asumiéndolos ideales.



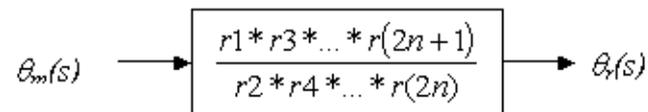
- Tercera etapa: Amplificador de potencia, dada su función de transferencia en el dominio de Laplace.



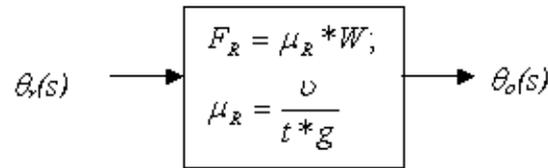
- Cuarta etapa: Incluye inercia equivalente de carga (J_m), amortiguamiento viscoso (D_m), relación entre voltaje de armadura y desplazamiento angular de armadura.



- Quinta etapa: Involucra exclusivamente al juego reductor de engranes, los radios de cada engrane son tomados en cuenta para la velocidad angular de salida si es mayor ó menor que la de entrada.



- Sexta etapa: Esta tiene un análisis especial de masas en movimiento y fuerzas contrapuestas, la rueda motriz desplazándose sobre la riel experimentará rozamiento de rodadura, lo que demandará establecer la fuerza mínima aplicada tangencialmente a la estructura para iniciar el giro, así como la fuerza mínima para mantener el giro a cierta velocidad angular. Se indican la fuerza de fricción de rodadura y el coeficiente de fricción de rodadura.



Donde μ_R es el coeficiente de fricción de rodadura de las superficies, v es la velocidad inicial de movimiento relativa entre ellas, W es el peso de la rueda y t es el tiempo que necesita la rueda en detenerse dada una velocidad inicial, g es el valor de la gravedad.

3.6.4. Resultados de evaluación del sistema y selección del lazo de control

Los diferentes bloques se interconectan tal como se aprecia en la figura 3.18.

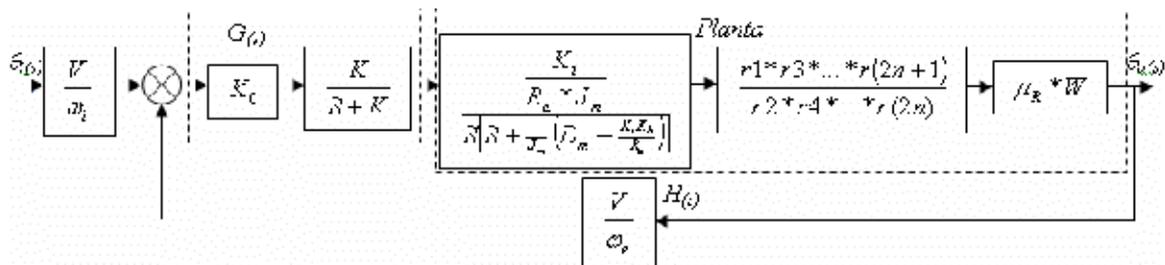


Fig 3.18. Sistema de posición de domo

El lazo se cierra con la inclusión del bloque de realimentación de posición, están detallados dentro de línea punteada los bloques que integran el controlador de sistema ($G(s)$) y la planta (motor más reductor de engranes y rueda).

Para la selección del lazo de control, se toma ventaja de la capacidad de cálculo y análisis del computador personal y del software asociado a este fin como lo es Matlab, que brinda la facilidad de obtención rápida y precisa de resultados en lugar de las raíces, ploteos de respuesta de frecuencia, estabilidad, para en definitiva establecer los parámetros óptimos de un controlador adecuados para el comportamiento del sistema.

3.7. SELECCIÓN DE MOTOR ELÉCTRICO

Por los conceptos de fricción de rodadura y fricción cinética, aplicados al material del que están hechos la rueda y el riel, existen valores de referencia⁵⁵ en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Coeficientes de fricción de rodadura y cinético de varios materiales

<i>Coeficiente de fricción</i>		
<i>Superficies</i>	Fricción de rodadura	Fricción cinética
Rueda de tren sobre riel	0.007	0.014
Rueda de automóvil en pavimento seco	0.015	0.8
Rueda de camión en pavimento seco	0.006 – 0.01	0.8

Entonces la fuerza de fricción de rodadura, conociendo $\mu_R = 0.007$ y $W = 6000 \text{ Kg.}$, estará dada por:

$$F_R = \mu_R * W \left[\frac{\text{Kg} * m}{s^2} \right]$$
$$F_R = (0.007) * (6000 * 9.8)$$
$$F_R = 411.6N$$

La fuerza destinada al arranque y frenado de la estructura involucra al coeficiente de fricción cinética (μ_K) en reemplazo del coeficiente de fricción de rodadura, por lo cual:

$$F_K = \mu_K * W \left[\frac{\text{Kg} * m}{s^2} \right]$$
$$F_R = (0.014) * (6000 * 9.8)$$
$$F_R = 823.2N$$

⁵⁵ http://en.wikipedia.org/w/Rolling_resistance

La prueba experimental realizada a la estructura consistió en enganchar un dinamómetro de manera tangencial (para este propósito sirvió una balanza lineal graduada de resorte con escala 0 – 100 Kg.) y halar del mismo para la medición de la fuerza necesaria que pueda vencer la inercia y posteriormente a una velocidad de giro constante determinar la fuerza para mantener dicho giro a velocidad constante. Los datos obtenidos se acercan razonablemente a los calculados, se determinó:

- La fuerza mínima para vencer la inercia es de 80 Kgf (calculado: 84Kgf).
- La fuerza mínima para giro constante a $2^\circ/\text{seg}$. es de 40 Kgf (calculado: 42Kgf).

De esto tienen que transformarse las fuerzas lineales en fuerza torsional ó torque para la selección de motor.

3.8. DIMENSIONAMIENTO DE CIRCUITOS DE POTENCIA

El proceso de posicionado de domo es en esencia sencillo, manejar par y posición para los dispositivos eléctricos y electrónicos de control y sobre todo los de potencia no supone mayor dificultad, lo que complica su desempeño es las características físicas de la estructura a mover. Al someter el domo a un empuje de la manivela y luego soltarla, adquiere una cierta velocidad con la que continúa el giro, y al detenerse experimenta un ligero “vaivén” hasta que se detiene por completo. El coeficiente de fricción de rodadura permite que el gran peso de la estructura se pueda mover con el empuje equivalente de dos personas. Se estipula el tiempo de perturbación en el vaivén de la estructura en fracciones de segundo a segundos completos, lo cual para un cuerpo móvil tan grande resulta relativamente estable.

El tipo de variador de velocidad a instalarse en el motor de inducción por tanto puede ser escalar al no exigir una muy elevada precisión. El variador utilizará un sistema de frenado dinámico, suficiente para detener la estructura móvil aún a su mayor velocidad. Los dispositivos semiconductores que emplee el variador deben operar en zona de conmutación (actúen como interruptores ideales on – off) y preferentemente elegir los de compuerta

aislada (IGBT) con características dinámicas y de tensión y corriente apropiadas para el control escalar del motor a utilizar.

No hay que olvidar las debidas protecciones tanto para variador como para motor, como contra sobrecargas, cortocircuito, térmicas, picos de tensión, etc.

3.9. SELECCIÓN DE SENSORES Y ACTUADORES

Los transductores más importantes en este proyecto son los de posición angular, los de presencia y los ambientales. Para la selección de una clase de transductor es necesario determinar aspectos como:

- Establecer el inicio y el final de movimiento: En el caso de la estructura móvil, ya fueron determinadas de forma arbitraria las posiciones iniciales de domo y de telescopio. En la medición de posición angular será de gran utilidad un encoder de preferencia incremental con una pequeña rueda de caucho acoplada a su eje, y esta a su vez dispuesta sobre el riel de domo para que transmita el movimiento giratorio del mismo hacia el eje del encoder y éste pueda entregar una señal que, debidamente acondicionada, ingrese al controlador principal para el sensado. La posición cero grados de referencia en domo será captada hacia el controlador mediante un interruptor magnético de proximidad, se escogió los del tipo que se utilizan para ventanas y puertas, son pequeños y de respuesta puntual y rápida.
- Principio de transducción: El encoder se basa en disco ranurado y detector optoelectrónico lo cual proporciona una señal de salida relativamente bien acondicionada, el interruptor de presencia también logra este objetivo al activarse justo al paso sobre la cabeza del imán dispuesto en la parte fija del domo donde se estableció la posición inicial.
- Exactitud y precisión: Los transductores intrínsecamente poseen una aceptable exactitud, lo que a veces trunca su implementación en determinado proceso es la repetibilidad de mediciones exactas (precisión), ya sea que las condiciones físicas del transductor, de entorno ó de compatibilidad con el sistema no permitan alcanzar la precisión demandada en estos casos. El encoder es sujeto de una

considerablemente alta precisión, es el transductor que menos puede fallar en el sistema. Dado que el desplazamiento angular de la estructura es grande y los encoder pueden suministrar varios pulsos de conteo por vuelta, entonces puede cumplir e incluso exceder el requisito pedido de precisión. El transductor de presencia para la posición de inicio cumple sólo con ese propósito, sin embargo su precisión debe ser similar a la del encoder porque trabajan en conjunto.

3.10. ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN ADECUADO⁵⁶

Existe el estándar de comunicaciones RS – 232 que aunque ya primitivo es suficiente para el uso del sistema de control de posición y del resto de actuadores excepto adquisición de imagen, es decir sólo para funciones básicas. Incluso es accesible y más actualizado el bus serie universal (USB); ambos poseen la característica de transmisión segura de datos a corta distancia, puertos bidireccionales, y facilidad de programación.

Para los dispositivos que puedan establecer comunicación hacia otros dentro mismo del observatorio, es suficiente utilizar un medio físico como el cable. La única salvedad es el establecimiento del estándar de comunicación deseado desde dispositivos en la parte fija al sistema móvil, en el cual se recomienda el uso de transeptores inalámbricos que mantendrán el enlace por más que se mueva el domo. La comunicación hacia la PC de usuario y entre microcontroladores principales y secundarios se detalla en la figura 3.19.

Sea el sistema de comunicaciones escogido, debe ajustarse a las especificaciones de software en el modo de control que el usuario ejerce sobre el proceso (cliente – servidor ó directo), los estándares RS – 232 y USB están de acuerdo a lo que el software necesita.

⁵⁶ http://www.bisque.com/help/theskyV6/Telescope/Telescope_Interface_Cables.htm
<http://www.salt.ac.za/fileadmin/files/telescope/Key%20aspects%20of%20the%20SALT%20control%20systems.pdf>

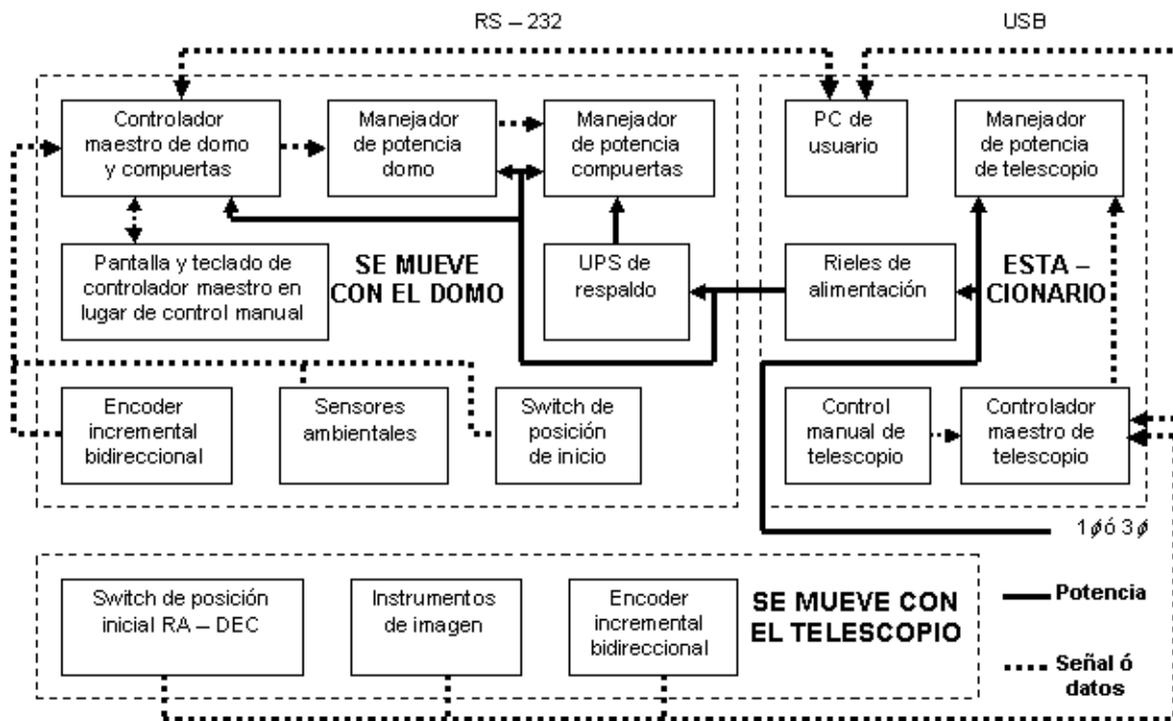


Fig 3.19 Vínculos entre cada dispositivo instalado en domo y telescopio

Cabe señalar si los dispositivos optoelectrónicos destinados para la observación (sensores CCD ó dispositivos de imagen en general) ejercen adquisición de datos hacia la PC de usuario, es imperiosa la implementación de un sistema de comunicación que ofrezca, a más de la fiabilidad, bidireccionalidad y facilidad de programación, soportar una mayor velocidad de transferencia de datos debido a que algunos de estos dispositivos de imagen deben capturar fotogramas de alta resolución y con un gran tiempo de exposición⁵⁷. De idéntica manera, habrá de considerarse un sistema que pueda transmitir dicha información a alta velocidad para difusión a través de Internet por ejemplo (los dispositivos de imagen pueden conectarse a la PC de usuario mediante un enlace de alta velocidad Ethernet ó incluso USB, y del PC hacia la Internet ó hacia una red multiusuario mediante bus Ethernet, Wireless, satélite ó hasta fibra óptica).

⁵⁷ <http://www.coseti.org/9512-003.htm>

3.11. PSEUDOCÓDIGO PARA PROGRAMACIÓN EN SOFTWARE

La necesidad de cada operación en los dispositivos del observatorio de ser manejada por software se rige principalmente a comandos, son la estructura principal del software destinado a automatización de observatorios. Aparte de responder a señales enviadas de sensores, el controlador principal de domo ejecuta las acciones de control para las que se encuentre programado justamente a base de un listado de comandos que al ser ingresados por el usuario los interpreta. Un comando puede ser una cadena de caracteres ASCII, con cierta nomenclatura y parámetros adicionales.

Los comandos aplican tanto para inicialización del sistema, diagnóstico y operación del mismo, aunque todo lo detallado es una revisión general del propósito del software a implementar en el sistema. Se describe más específicamente las tareas y restricciones de cada función del software de automatización de domo a continuación:

- El software de control de domo debe establecer comunicación tanto con la PC de usuario tanto con los controladores secundarios.
- Los enlaces de comunicación de datos deben tener configurado el puerto (bits de arranque, parada, paridad, etc.) para una transmisión y recepción segura y relativamente rápida.
- El algoritmo de control del controlador principal esté en capacidad de realizar la rutina de primer plano (ejemplo ejecución de comandos para controlador desde PC) y una ó varias subrutinas de segundo plano (captura de posición y ejecución de manejadores de potencia).
- Dicho algoritmo cubrirá los movimientos y requerimientos operativos del sistema como encendido general, apertura – cierre de compuertas, parqueo de domo, posición de inicio, adquirir azimut de domo, etc, sea en plano principal ó secundario.
- La adquisición y procesamiento de ciertos datos de sensores como el encoder involucra que el software desarrolle cálculos (generación de tiempo sideral,

determinar tiempo de observación, etc.) ó deba realizar interpolación de los mismos, siempre y cuando no excedan la capacidad de cálculo del controlador pueden realizarse directamente en el mismo, de lo contrario si dichos cálculos manejan precisiones muy altas ó si no satisface un eventual procesamiento y despliegue de datos en tiempo real ó intervalo de tiempo de actualización de datos, es preferible que el PC de usuario tome y procese los datos en tiempo real para entregar un dato procesado al controlador.

- Los comandos a estipularse, sobre todo en movimiento de domo, harán que el hardware funcione con la debida precisión y de manera segura, evitando que permanezcan funcionando a la deriva si el controlador u otro dispositivo falla (permita parada de emergencia ó cancelación de cualquier comando).

El ejemplo de pseudocódigo para el comando de posicionado rápido y seguimiento de un astro para telescopio y sincronización de apertura central de domo se detalla de la siguiente forma:

Inicio

Inicialización y calibración de dispositivos

Ingreso de coordenadas de astro ascensión recta y declinación

Leer posición angular actual de domo

Leer coordenadas actuales de telescopio

Obtención de ángulo horario a partir de tiempo sideral local

Adquisición y despliegue instantáneo de ángulo horario

Determinar si el astro es visible en el horizonte

Si es visible, enviar telescopio a la posición ingresada

Lectura de posición instantánea de telescopio por parte de controlador de domo

Conversión de coordenadas celestiales a coordenadas horizontales

Linealización de azimut de domo

Cálculo del tiempo de movimiento de domo hacia azimut deseado

Agregar el desplazamiento de azimut debido al tiempo de movimiento

Enviar azimut de domo a manejador de potencia

Si llega al azimut deseado, activar freno

Activar seguimiento de astro en telescopio

De no activar seguimiento, el programa preguntará si se apunta a otro astro

Fin

3.12. INTERFASE DE USUARIO

Con el bosquejo de programa, es posible optar por diferentes plataformas para desarrollar una aplicación que, cumpliendo las especificaciones de software facilite una interacción amigable con el usuario. Los lenguajes de programación gráficos son una excelente alternativa como ya se ha mencionado.

Para exponer un ejemplo de aplicación dedicada a la automatización de domos se ha basado en paquetes de software existentes para grandes y medianos observatorios, emulando sus pantallas y menús principales y adaptándolas a la necesidad de este proyecto. Los menús principales representados en Visual Basic se muestran en la figura 3.20.



Fig 3.20. Ventana principal del programa para automatización de domo

En cada menú se despliegan sub - menús que se describen a continuación y se muestran en las figuras 3.21 y 3.22:

Archivo:

- Control de usuarios: permite mediante contraseña la utilización del software y su hardware asociado en los niveles de operario y administrador.
- Abrir/guardar archivo de trayectoria: guardar permite el almacenamiento en un archivo de texto de la secuencia de movimientos efectuados por el operario en una

sesión de observación para observar el mismo astro la noche siguiente mediante el comando de abrir.

- Preferencias: Desplegará un cuadro de dialogo para habilitar entre otras cosas el autoguardado de trayectorias, prioridad entre control manual y mediante la PC, opciones que se puedan o no permitir desde PC remotos en los distintos niveles de acceso, etc.
- Salir: Abandona el programa, con confirmación para que de ser afirmativa retorna la estructura a su posición inicial, cierre compuertas y quite el suministro eléctrico principal.

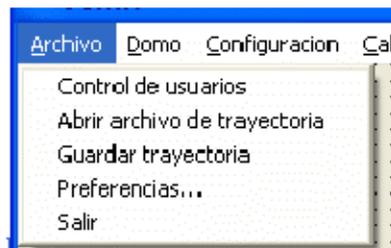


Fig 3.21. Menú “Archivo”

Domo:

- Conectar: Inicializa el enlace de comunicaciones serial, de ser exitosa mostrará “conectado”, de lo contrario reintentará por un “n” numero de veces hasta que de no darse muestre “error de conexión”.
- Obtener información: Una vez establecido enlace de comunicación entre PC y microcontrolador, se desplegará en pantalla datos del domo adquiridos en tiempo real (arranca o no desde su posición inicial, posición angular instantánea, estado de compuertas), si es posible vincule un gif animado que represente al domo mismo moviéndose; desplegará datos del telescopio (ascensión recta y declinación) adquiridos por el micro mediante los encoders instalados en los ejes del telescopio, y finalmente una cuantificación del estado climático en ese instante (temperatura, humedad relativa, presencia de lluvia, etc.

- Posición inicial: Retornará el domo a su posición inicial en cualquier instante, previamente a su ejecución detendrá todo comando anterior.
- Mover: El menú “Mover” solamente actuará como pulsantes de arranque y parada manuales, pero dentro del software de la PC; mientras se tiene presionado el botón de avance a izquierdas o derechas (se mostrará la posición instantánea del domo al moverse) el micro responderá y ha de mover el domo en forma acorde hasta que se suelte dicho botón y el sistema detenga el movimiento.
- Ir a: Se diferencia del menú “Mover” en que actúa de forma automática, generando el micro el movimiento por si solo y calculando la trayectoria más cercana hacia la posición deseada; todo esto al ingresar en valor numérico el azimut (posición angular) a la que queremos que se mueva el domo.
- Compuertas: Desplegará botones para apertura/cierre, y existirá una opción para abrir solo la mitad de las 4 compuertas que cruzan todo el diámetro del domo (útil para realizar observaciones con “la mitad” del domo abierto y cerrar la otra mitad para evitar en cierta manera la luz contaminante de edificaciones aledañas). El menú “Mover” y el menú “Ir a” realizan lo que se denomina como “slewing”, es decir aplican una velocidad relativamente alta ($2^\circ/\text{seg.}$) para un posicionado rápido del domo.
- Modo esclavo: El micro en este caso adquiere la posición de los ejes del telescopio en ese instante y manda a igualar la posición de la abertura del domo (de no estar alineados) para que puedan arrancar el denominado “tracking” que significa mover telescopio y domo para seguimiento de un astro observado, tomando en cuenta el movimiento aparente de los astros en el cielo (en algunos casos tan lento como $0,3^\circ/\text{min.}$). El telescopio posee un pequeño motor a pasos que le permite un movimiento casi imperceptible, el motor del domo no puede moverse demasiado lento, así que girará normalmente “a pasos” de 1 o 2 segundos cada 5 minutos (es una razón de velocidad sugerida) con tal de que la abertura del domo no se salga del eje óptico del telescopio.

- Autoapagado: Temporizador para apagado automático. Transcurrido el tiempo establecido en la configuración y antes de apagar ejecutará todo lo descrito en el menú “Salir”

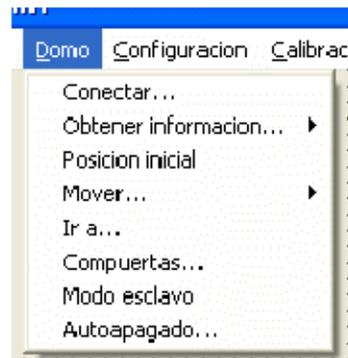


Fig 3.22. Menú “Domo”

Configuración:

- Datos de entrada: Establece límites para conteo de encoders, tolerancia de posición de domo, temperatura, humedad, pluviosidad, FCEM, etc.
- Parámetros de inicialización: establece el factor de encoders, cuanta zona muerta se le aplica al sistema, setear el tiempo antes de apagado automático, y los valores mínimos necesarios de variables atmosféricas para que se permitan las observaciones.
- Selección de puerto: escoger que tipo de conexión serial o paralela para el enlace con el micro, y configuración típica de cada uno (baud rate, flow control, parity, etc.).
- Tipo de telescopio y montura: datos de dimensiones físicas relacionados exclusivamente con el telescopio, solo como fuente de información.
- Seguros: establece la visualización y si se da el caso las debidas advertencias sobre seguros de compuertas abiertos, y en algunos casos setear bloqueo de otros menús de ocasionarse problemas con los mismos. Las figuras 3.23 a la 3.25 muestran los sub – menús de este menú.



Fig 3.23. Menú “Configuración” con sub – menú “parámetros de inicialización”

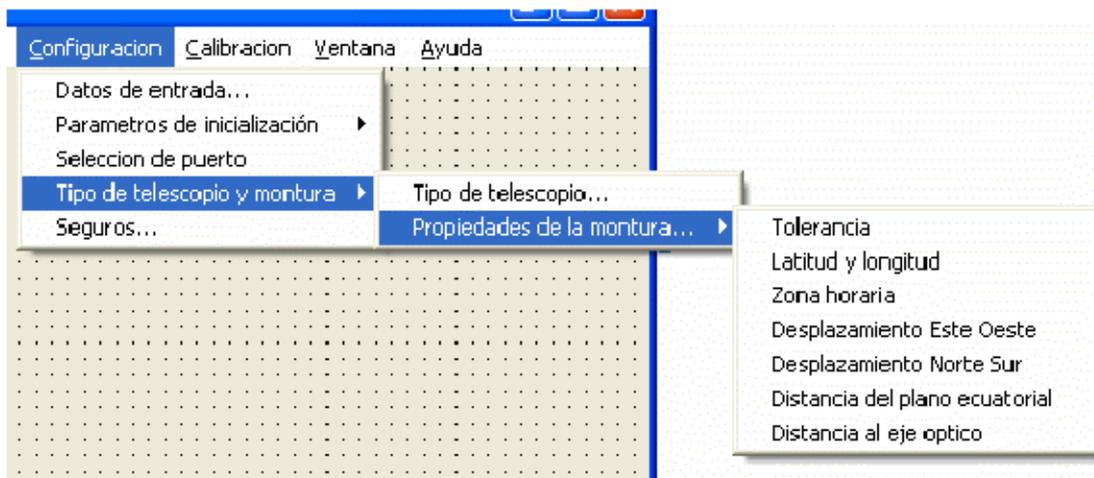


Fig 3.24. Menú “Configuración” con sub – menú “Tipo de telescopio y montura”



Fig 3.25. Menú “Calibración”

3.13. MANDO MANUAL PARA DOMO

Es un dispositivo de control para domo y telescopio que habilita la mayoría de operaciones en el sistema a base de botones, perillas, indicadores, etc. sin la intervención del PC de usuario. Posee botones para giro en sentido de las manecillas ó en contra de las manecillas del reloj. Estos botones mantienen girando al domo mientras no se deje de aplastarlos.

Pueden operar aun sin la ayuda del programa principal de usuario (tienen conexión directa a la alimentación). Los seguros y ciertas funciones no funcionarán en el modo paddle. Un mando manual puede incluso hacer trabajar al domo como esclavo del telescopio nuevamente sin la intervención de la PC.

En el caso del mando manual para telescopio puede desempeñar funciones diversas como autoguiado, configuración, enfoque; para el domo el mando manual muy frecuentemente se limita a mover la estructura a determinado azimut en uno u otro sentido y otro más para selección de velocidad. No se omiten los indicadores del mando que reportan el estado actual de la operación, puede ser simples LEDs hasta pantallas LCD. Por último puede estar dotado de otros botones para apertura/cierre de compuertas. Actúan como pulsantes de inicio y los fines de carrera como pulsantes de paro. También estos botones pueden operar sin el controlador. Dos ejemplos de mando manual se muestran en la figura 3.26.

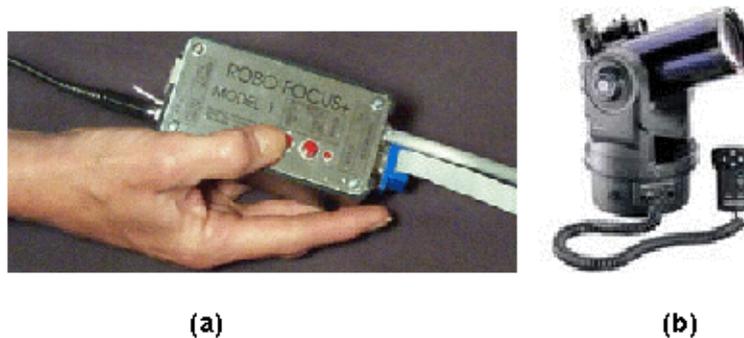


Fig 3.26. (a) Mando manual para domo del sistema de automatización de domo Robofocus; (b) telescopio y mando manual del LX – 200

CAPÍTULO IV

PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL PROTOTIPO

4.1. ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para tener una mejor apreciación del sistema y acercamiento a los resultados reales de una implementación, fue construida una estructura metálica similar a la del Observatorio Astronómico de La Alameda de Quito, guardando la relación de aspecto y componentes móviles esenciales para la demostración del sistema de control de azimut de domo. El volumen de la misma es 512 veces menor que la real (se redujo en un factor de 8 el ancho, alto y espesor). El peso móvil de la misma es 20 kilos. Dentro de dicha estructura se realizó también un prototipo de telescopio con las mismas especificaciones de construcción aplicadas al domo, telescopio que posee la misma movilidad que el real a base de la adecuación a cada eje de motores a paso unipolares (200 pulsos por revolución) y manejados por una tarjeta electrónica con el PIC18F2550 y de éste hacia la PC de usuario con puerto USB. La figura 4.1 muestra un primer plano de la estructura de domo y telescopio.



(a)



(b)

Fig 4.1. a) Estructura metálica de domo; b) Estructura de telescopio

El domo posee instalado en el lateral exterior de su pared el microcontrolador PK – 2100 de la casa Zworld conectado a la PC mediante cable especial RS – 232 con conector DB9

en un extremo y RJ en el otro, con su teclado y pantalla hacia el exterior para poder operarlo y observar su estado. Se puede apreciar en la figura 4.2.

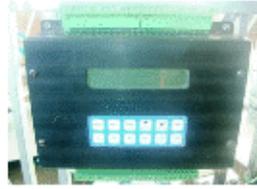


Fig 4.2. Microcontrolador instalado en domo

Junto al micro aparecen adosados a la pared los relés de marcha e inversión de giro del motor eléctrico principal, este último es del tipo universal, su eje viene acoplado mecánicamente a una rueda motriz de caucho a través de un reductor de velocidad a base de engranes rectos. Los relés y el motor con su reductor se muestran en la figura 4.3.



(a)



(b)

Fig 4.3. a) Placa donde están dispuestos los relés; b) Acople metálico para adaptación de motor

Adosada también a la pared se encuentra la electroválvula, la cual regula el aire comprimido mediante tubería plástica a dos cilindros neumáticos de doble efecto instalados adecuadamente en una compuerta lateral y una superior para la apertura y cierre de las mismas. La ubicación de electroválvulas y cilindros se muestra en la figura 4.4.



(a)



(b)



(c)

Fig 4.4. a) Electroválvula ubicada en pared de domo; b) Ubicación de cilindro neumático de compuerta superior; c) Ubicación de cilindro neumático de compuerta lateral

Existe una instalación especial para el sensor de azimut justo debajo de la base, es una rueda de caucho acoplada a un pequeño encoder incremental, se los encuentra en los ratones de PC con rueda de “scroll”. Se muestra en la figura 4.5.

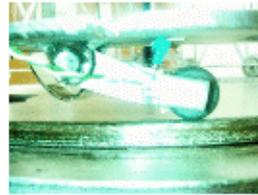


Fig 4.5. Encoder incremental con rueda de caucho instalada en base de domo

Se realizó una incisión en la parte metálica de la base del domo en donde se encuentra la posición cero grados, allí se instaló un interruptor magnético el cual servirá para sensar la posición de inicio. El piso del prototipo sirve de plataforma para el giro del domo mediante ruedas deslizándose sobre un riel de hierro. Muy junto al riel, en cada punto cardinal del piso existen imanes de referencia al interruptor de posición inicial. El interruptor magnético y los imanes en el piso se muestran en la figura 4.6.



(a)



(b)

Fig 4.6. a) Interruptor magnético; b) Uno de los cuatro imanes instalados

Por último en el techo del prototipo se encuentra una placa de circuito impreso la cual contiene al sensor de lluvia, que se muestra en la figura 4.7.



Fig 4.7. Sensor de lluvia

4.2. INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA

El prototipo se dispondrá de la misma forma que la estructura real en su posición de inicio para empezar una sesión de observación. Como se detalló en el capítulo anterior, la posición inicial de domo será en cero grados, con las compuertas accionadas por cilindros apuntando al punto cardinal Norte. Para esto, el controlador inicialmente debe tener señal del interruptor magnético, de lo contrario accionará el motor empezando el giro, luego el usuario detendrá el movimiento apenas llegue al punto Norte.

El siguiente paso es la apertura de compuertas, se accionan desde el controlador y ambas deben abrirse lo suficiente para que la apertura central no esté obstruyendo el eje óptico del telescopio.

El telescopio posee una posición inicial con el eje de ascensión recta perpendicular al suelo y con el eje de declinación en +90 grados. El cable USB que rige el movimiento del telescopio pasa por debajo del piso hasta la PC, en la cual estará listo el archivo ejecutable que servirá al usuario para activar los distintos movimientos y monitorearlos.

El controlador capta señal del interruptor magnético, del encoder, de los switches límite y del sensor de lluvia. Apenas se enciende con estos sensores realiza un proceso similar al “polling” para saber si puede o no comenzar la sesión. Posteriormente desplegará en pantalla el menú con las distintas opciones para desplazamiento rápido, “tracking” ó fin de sesión.

4.3. PRUEBAS EN DESPLAZAMIENTO ANGULAR

Como se tienen dos velocidades de desplazamiento angular del domo, se debe experimentar en el caso del posicionado rápido ingresando varias posiciones angulares y que la estructura se detenga en aquel ángulo con una precisión aceptable, y en el caso del “tracking” lo importante es que la abertura en ningún instante mientras dure el tiempo de exposición obstruya al eje óptico.

4.3.1. Pruebas en posicionado rápido

A continuación se operará en posicionado rápido, puede ser desde la PC ó desde el teclado del microcontrolador para ingresar posiciones angulares. Previo a esto el telescopio dirigirá su eje óptico hacia el astro a ser observado, para aquello la PC proporcionará la ascensión recta y declinación desde el programa de simulación interactiva de esfera celeste, luego en la misma PC estas coordenadas serán convertidas a altitud y azimut. Cabe recordar la no linealidad entre posición angular de telescopio y la de domo, conversión de la que se encarga la PC para la obtención del azimut final que ingresará al controlador de domo. Hacia este azimut instantáneo se dirigirá la abertura central.

Tabla 4.1. Posicionado rápido en telescopio para astros al azar visibles en el horizonte

Astro	RA	DEC	δHor^{*1}	Dir.Dec	Alt.^{*2}	Az.^{*2}	Alt.	Az.	Err Az
Regulo	10h08'51"	+11°55'30"	-1.57h	Oeste	22.97°	283°	24°	290°	2.5%
Altair	19h51'12"	+08°53'22"	+0.72h	Este	10.68°	80.9°	10°	81°	0.12%
Antares	16h29'57"	-26°27'08"	+4.08h	Este	51.82°	135.7°	54°	138°	1.7%
Vega	18h37'14"	+38°47'23"	+1.96h	Este	22.32°	47.25°	25°	50°	5.8%
Mizar	13h24'17"	+54°52'45"	-4.82h	Oeste	33°	348°	34°	351°	0.8%
Alfa Cent.	14h40'46"	-60°52'21"	+5.9h	Este	29.33°	179.2°	32°	180°	0.45%
Alfa Crux	12h27'04"	-63°08'52"	-3.88h	Oeste	22.75°	195°	24°	198°	1.5%
Spica	13h25'40"	-11°12'27"	-4.85h	Oeste	69.65°	236.7°	70°	240°	1.4%

*1 Delta Horario (Angulo horario – 6H00min00seg si Angulo horario < 12H00min00seg; Angulo horario – 18H00min00seg si Angulo horario > 12H00min00seg)

*2 Calculados a la fecha 18 – Julio – 2008, hora local 19h00.

Tabla 4.2. Posicionado rápido en domo según datos del telescopio

Astro	Azimut telesc^{*3}	Azimut domo^{*4}	Azimut domo	Desalineamiento
Regulo	283°	273.79°	270°	-3.79°
Altair	80.9°	90.23°	90°	-0.23°
Antares	135.7°	142.2°	144°	+1.8°
Vega	47.25°	54.16°	57°	+2.84
Mizar	348°	346.12°	347°	+0.88°
Alfa Cent.	179.2°	179.33°	180°	+0.67°
Alfa Crux	195°	192.6°	192°	-0.6°
Spica	236.7°	228.89°	230°	+1.11°

*3 Instantáneo calculado

*4 Calculado y linealizado, 18 - Julio – 2008, 19h00

4.3.2. Pruebas en velocidad de “tracking”

Con la apertura de domo dispuesta en cierto azimut del proceso de posicionado rápido, empieza el “tracking” ó seguimiento de astro ingresando el tiempo que el telescopio va a mantenerse apuntando hacia él. Aquí debe ingresarse al controlador de domo ascensión recta y declinación del astro con el propósito de que en el transcurso del tiempo de exposición calcule el azimut instantáneo, con esto el controlador moverá la estructura en pasos de 1 a 5 grados cada vez que el azimut del telescopio y el de domo salgan de alineación. Significa que un paso del domo se dará cada 2 ó 3 minutos en promedio para altitudes no mayores a los 60 grados, cuando el astro se aproxime al zenit es donde el ritmo de pasos se acelerará.

Tabla 4.3. Seguimiento de astro para diferentes casos en objetos visibles

<i>Objetos cercanos a los polos celestiales</i>						
Astro	RA	DEC	Inicio tiempo exp	Az.	Desa.max	Ocultamiento
41 Draconis	17h59'30"	+80°00'08"	19h00 – 18 Julio	7.8°	2°	NO
Xi Octantis	22h51'12"	-80°04'40"	23h12 – 18 Julio	171.3	2.5°	NO
<i>Objetos intermedios</i>						
Alderamin	21h18'46"	+62°37'18"	20h30 – 18 Julio	26.9°	2.5°	NO
Zosma	11h14'35"	+20°28'34"	19h00 – 18 Julio	296.1	2°	NO
Fomalhaut	22h58'08"	-29°34'33"	21h48 – 18 Julio	119.7	3°	NO
Alfa crux	12h27'05"	-63°08'52"	19h00 – 18 Julio	195°	1.5°	NO
<i>Objetos cercanos al ecuador celeste</i>						
10 Ceti	0h27'05"	-00°00'23"	23h12 – 18 Julio	89.98	10°	SI
Heze	13h35'09"	-00°38'29"	19h00 – 18 Julio	268.3	0.5°	NO

4.4. PRUEBAS EN EL RESTO DE SENSORES Y ACTUADORES

Se pueden enlistar los sensores y actuadores que complementan al sistema de control y puntualizar las pruebas a las que deben someterse:

- Comprobar la efectiva apertura y cierre de compuertas.
- Asegurarse de que el interruptor magnético se active al pasar sobre los imanes en cada punto cardinal.

- El encoder entregue pulsos de conteo sin distorsión ni rebotes al girar de la estructura.
- La rueda de caucho se mantenga siempre en contacto con el riel y sin salirse ni resbalar del mismo.
- El detector de lluvia si se activa debe cerrar inmediatamente las compuertas.
- Las salidas a relé deberán encender el motor como también establecer la secuencia correcta para inversión de sentido de giro.
- Correcto funcionamiento del control manual

Tabla 4.4. Diagnóstico de sensores y actuadores

<i>Sensor ó actuador</i>	<i>Funcionamiento</i>	<i>Observaciones</i>
Compuertas	CORRECTO	Instalar tubería de igual longitud hacia cada cilindro
Interruptor magnético	CORRECTO	Contará doble al pasar pero se soluciona en software
Encoder	CORRECTO	Salto bruscos de conteo a velocidad alta
Detector de lluvia	CORRECTO	Ligera inestabilidad del circuito debido a sensor
Relés	CORRECTO	Sin problemas ambos sentidos de giro
Pad manual	CORRECTO	Sin problemas

4.5. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.

Basados en el desempeño del sistema de control de domo en el prototipo, cabe mencionar los alcances y limitaciones que se evidenciaron en la realización de las pruebas.

Dentro de los alcances se señalan:

- Mayor celeridad en el proceso de observación de un astro al motorizar el movimiento de domo.
- Independencia de uso de las instalaciones del Observatorio, convencionalmente se necesitan al menos dos personas para dirigir una sesión de observación, ahora un solo operario puede manipular todo el sistema sin mayores inconvenientes.
- Sistemas de seguridad y protección ante condiciones climáticas adversas que aún suele hacerse mediante inspección visual hacia el cielo.

- Alternabilidad de sitio respecto a la consola de control para el usuario, pudiendo ubicarse dentro mismo del Observatorio ó en una torre contigua.
- Mayor rendimiento del Observatorio al incrementar las horas hábiles de observación por año, con la única salvedad del número de noches despejadas en ese lapso.
- Ahorro en implementación respecto a las soluciones comerciales para automatización de domos.

Las limitaciones halladas en el sistema se mencionan:

- El sistema a implementar aunque se sirve de instrumentos y sensores que en Automatización y Control son bastante confiables y precisos, cubren sólo parcialmente los estándares de calidad y precisión que exigen los observatorios astronómicos “profesionales”.
- El control de azimut debe mover la estructura de domo con suavidad y precisión ya que si bien el domo está conformado en su mayoría por hierro se construyó hace más de 100 años, por lo que el desplazamiento angular se mantendrá lento para no provocar daños significativos.
- El proceso de establecer que el controlador de domo funcione como esclavo del controlador de telescopio dependerá de la compatibilidad entre ambos ó de cada uno hacia la PC de usuario.
- La operación de domo se rige en su interfase a comandos que se familiarizan más con la Automatización, Control y software en general que con la Astronomía, ya que ésta última posee comandos estandarizados e interfase visual para diferentes procesos dentro de un observatorio.

4.6. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICO.

El propósito del análisis de factibilidad abarca la implementación del sistema de control en el Observatorio con las herramientas de hardware y software genéricas y alternativas propuestas en este proyecto frente a la misma implementación adquiriendo hardware y software considerado “de marca” para obtener un desempeño aceptable. Un paquete de software de una compañía especializada en desarrollo de programas para observatorios astronómicos para cada dispositivo se detalla en la tabla 4.5. El hardware compatible con dicho software y que se instale para que el software funcione por completo se detalla en la tabla 4.6.

Tabla 4.5. Detalle de costos en software de la casa Software Bisque

Nombre	Descripción	Costo (USD)
TheSky6	Destinado a control de telescopio y guía para sesiones de observación	Versión estudiantil: 49 Versión astrónomo aficionado: 129 Versión profesional: 279
CCDSOFT Camera Control Software	Para sensores de captura de imagen CCD, control de cámara y procesamiento de imagen	349
Tpoint	Análisis de apuntado de telescopio	249
Orchestrate	Integrador de software de control	99
Automadome	Automatización de domo	249
TheSky6 Pocket Edition ^{*5}	Versión para PC de bolsillo del programa TheSky6	129
Precision Error Corrector ^{*5}	Corrige imprecisiones de movimiento en montura	99
Manuales y similares		100
TOTAL		1553

*5 Opcional

Este es el costo por la adquisición de los paquetes de software básicos, de manera individual. Hay que subrayar un aspecto: debe agregarse el importe debido a la compra y envío de los mismos desde Estados Unidos ya que software de este tipo no existe de forma comercial en el país.

Tabla 4.6. Detalle de costos en hardware

<i>Dispositivo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Costo (USD)</i>
Paramount ME Robotic Telescope Mount	Sistema robótico de montura y telescopio, incluye TheSky6 Professional, CCDSoft, Tpoint, Orchestra y Client and Server applications	14500
Telescope Control System	Controlador principal de telescopio	Versión estándar: 5000 Versión profesional: Bajo pedido
Computador de escritorio	Equipo suficiente para dar soporte tanto a hardware y software	1000
TOTAL		20500

Para culminar la adaptación de todo el hardware a las instalaciones del Observatorio, se requiere de componentes adicionales que son accesibles en nuestro mercado, detallados en la tabla 4.7:

Tabla 4.7. Detalle de costos en hardware adicional

<i>Nombre</i>	<i>Costo (USD)</i>
Motor trifásico para domo	100
Reductor mecánico	100
Variador de frecuencia trifásico	300
Slip rings (Rieles de alimentación)	2000
Fuente de poder ininterrumpida (UPS)	300
Encoder incremental	200
Estación meteorológica	N/A (Se dispone de una)
Actuadores de compuertas	300

Transmisor – receptor inalámbrico	200
Cableado y misceláneos	100
SUBTOTAL	3600
IVA 12%	432
TOTAL	4032

Para la implementación de hardware y software con lo proporcionado por la casa Software Bisque la cifra total es de \$26085 (veintiséis mil ochenta y cinco dólares americanos). Como dato adicional, para adquirir una estructura de domo fabricada en aluminio junto al pedestal para montura representa un desembolso aparte en promedio de \$10000. Los componentes en hardware y software antes descritos pueden ser reemplazados por equivalentes de igual desempeño pero con una significativa reducción de costo, detallados en la tabla 4.8, que incluye obviamente algunos de los ítems de hardware de la tabla 4.7.

Tabla 4.8. Detalle de costos en hardware y software

Nombre	Costo (USD)
Microcontrolador ó controlador lógico programable (PLC) para domo	250
Microcontrolador para telescopio	50
Servomotores ó motores a pasos para telescopio	100
Cámara web ó dispositivo similar	50
Motor trifásico para domo	300
Reductor mecánico	100
Variador de frecuencia trifásico	300
Slip rings (Rieles de alimentación)	2000
Fuente de poder ininterrumpida (UPS)	300
Encoder incremental	200
Estación meteorológica	N/A (Se dispone de una)
Actuadores de compuertas	300
Transmisor – receptor inalámbrico	200
Cableado y misceláneos	100
Desarrollo de aplicaciones para control de domo y de telescopio	200
Desarrollo de aplicación para adquisición y procesamiento de imagen	300

Computador de escritorio ó portátil	1000
Software de catálogo de astros y simulación de esfera celeste	Freeware
SUBTOTAL	5750
IVA 12%	690
TOTAL	6440

No se incluye el costo por mano de obra en metalmecánica y material adicional que requiera para la misma. Poniendo a un lado el afirmar que no todo el hardware y software de marca será necesario para la implementación en el Observatorio de la Alameda por el hecho de que tiene propósito de divulgación de la Astronomía solarmente, se confirma la substancial diferencia de costo comparado a la implementación descrita en este proyecto, a casi una cuarta parte y evitando la demora que significaría traer casi todo de los Estados Unidos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ◆ La implementación del sistema de automatización de posición de domo ó cúpula para el Observatorio Astronómico de la Alameda es técnica y económicamente factible, demostrado con el prototipo experimental y el análisis de costos.
- ◆ Con el sistema implementado, podrá una sola persona aún dentro mismo del domo del Observatorio con una PC de supervisión y control converger todos los dispositivos y operarlos sin mayor problema.
- ◆ El prototipo experimental permitió visualizar de mejor manera las características estáticas y dinámicas de la estructura original del Observatorio en vez de realizarlo con herramientas de software. Adquirió casi la misma resistencia al movimiento, la misma robustez de estructura, y se trató de guardar la mayor similitud posible.
- ◆ Las desalineaciones entre línea central de apertura de domo y eje óptico del telescopio están dentro de los límites para evitar ocultamiento, salvo la prueba de seguimiento de astro “10 Ceti” donde debe ejecutarse lo que en términos de astronomía se conoce como “reversal”, no es más que el paso instantáneo de azimut entre 90° y 270° , que es donde se presentó ocultamiento.
- ◆ Por la velocidad que se efectúa la prueba de posicionado rápido, el domo al detenerse súbitamente debido al microcontrolador sufre un ligero patinaje de ruedas que desplaza al domo de su posición en un máximo de $+5^\circ$. La estructura original del Observatorio se prevé que padezca un patinaje similar, pero hay que tomar en cuenta la velocidad máxima recomendada para observatorios en este caso y evitarlo.

- ◆ El seguimiento de astro se realizó en base a trayectorias calculadas de astros, mas no en el tiempo sideral local, que es como debería hacerse. La justificación es porque para motivo de demostración práctica se “acelera” la velocidad de movimiento de la esfera celeste con lo que así se puede apreciar cómo el telescopio se mantiene apuntando a un astro y el domo permite la observación siguiendo el movimiento del telescopio.
- ◆ El sensor de lluvia sirvió como un pequeño parámetro de lo que se lograría con una estación meteorológica completa funcionando para el observatorio, nada más es una introducción a ello y una forma básica de protección a los dispositivos.
- ◆ En el caso del motor eléctrico del prototipo, inicialmente se pensó está sobredimensionado, que podría alterar las características originales, sin embargo al momento de las pruebas tal sobredimensionamiento no incidió en el comportamiento esperado del movimiento. El factor de reducción del reductor mecánico esta dentro de lo recomendado para observatorios.
- ◆ Tampoco incidieron el resto de dispositivos instalados como cilindros neumáticos, relés, electroválvula, microcontrolador, encoder, interruptor magnético.

5.2. RECOMENDACIONES

- ◆ Para el prototipo por simplicidad no se tomaron en cuenta ciertas adecuaciones que se deben hacer para la eventual implementación real en el Observatorio como los rieles electrificados y la comunicación inalámbrica entre dispositivos.
- ◆ La implementación de rieles electrificados para alimentación de energía al domo surge como una solución “eléctrica” al problema del giro de la estructura. Los elementos como motor, variador de frecuencia y controlador principal de domo van a moverse con el domo pero siempre estarán conectados a la red eléctrica por medio de estos rieles. Cabe señalar que existe otro tipo de solución, consiste en hacer estático al motor y variador de frecuencia y mediante una hilera dentada circundando al domo hacerlo girar, catalogada como una solución “mecánica” que también es factible pero puede alterar seriamente la solidez de la estructura metálica del domo.
- ◆ Ya que los componentes de control deben moverse con el domo, obligatoriamente los enlaces de comunicación deben ser en modo inalámbrico, porque correrían riesgo de introducción excesiva de ruido al pretender enviarlos a la parte fija del domo por un riel similar a los de electrificación.
- ◆ En el prototipo se utilizaron cilindros neumáticos para la apertura y cierre de compuertas laterales y superiores, para la implementación real pueden tomarse en cuenta para las compuertas laterales e inclusive reemplazar al tornillo sinfín que permite abrir las compuertas superiores.
- ◆ Se determinó en el prototipo que sólo una compuerta lateral y una superior contigua se operen para la apertura central de domo, así se instalarían los dispositivos de accionamiento sólo en dichas compuertas y no en todas.

GLOSARIO

- A -

Adquisición de datos: Es la toma de muestras del mundo real para generar datos que pueden ser manipulados por un ordenador. Consiste en tomar un conjunto de variables físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora.

Altitud: Arco de vertical contado desde el horizonte hasta el astro.

Amortiguamiento: Suavizamiento de la característica de respuesta al impulso unitario de una variable.

Ángulo horario: Es el arco de ecuador contado desde el punto de intersección del ecuador con el meridiano del observador hasta el círculo horario del astro, en sentido horario. Aunque se podría medir en grados, para su medida se usa la hora, unidad que equivale a 15° .

Apertura: Espacio del domo que al abrirse las compuertas dejan disponible para que la lente del telescopio realice observaciones sin obstrucción.

Ascensión recta: Una de las coordenadas astronómicas que se utilizan para localizar los astros sobre la esfera celeste, equivalente a la longitud terrestre (coordenada geográfica).

Astro: Un astro se refiere a cualquier cuerpo celeste con forma definida. Existen infinidad de astros en el Universo, de los cuales los astrónomos han categorizado varios tipos, como estrellas, cometas, planetas, meteoros, satélites y otros.

Astrofísica: Estudio de la física del universo. Si bien se usó originalmente para denominar la parte teórica de dicho estudio, la necesidad de dar explicación física a las observaciones astronómicas ha llevado a que los términos astronomía y astrofísica sean usados en forma equivalente.

Astronomía: Es la ciencia que se ocupa del estudio de los cuerpos celestes, sus movimientos, los fenómenos ligados a ellos, su registro y la investigación de su origen a partir de la información que llega de ellos, a través de la radiación electromagnética o de cualquier otro medio.

Azimut: Es el ángulo medido sobre el horizonte que forman el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte.

- B -

- C -

Catálogo astronómico: Es una lista tabulada de objetos astronómicos, típicamente agrupados porque comparten un tipo común, morfología, origen ó método de descubrimiento.

Cenit: La intersección entre la vertical del observador y la esfera celeste.

Cobertura del cielo: Extensión de la esfera celeste que puede ser apuntada por el eje óptico de un telescopio.

Comandos astronómicos: Órdenes estandarizadas enviadas al hardware de un observatorio para ejecución de acciones de control ó supervisión.

Compuertas: Segmentos de pared ó techo de domo que se abren para habilitar la apertura central del mismo.

Contaminación lumínica: Puede definirse como la emisión de flujo luminoso de fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios para la realización de las actividades previstas en la zona en la que se instalan las luces.

Coordenadas celestiales: Son el conjunto de valores que, de acuerdo con un determinado sistema de referencia, dan la posición de un objeto en la esfera celeste.

- D -

Declinación: Ángulo que forma el astro con el ecuador celeste.

Delta horario: Diferencia entre la posición actual del eje de ascensión recta del telescopio y el cenit (cuando la posición instantánea del eje apunta al cenit, delta es cero).

Desalineamiento: Medición de concordancia entre eje óptico del telescopio y centro de apertura del domo.

Domo: Cubierta cóncava de un edificio, por lo general de forma semiesférica, sobre una planta circular o elíptica; en el caso de observatorios astronómicos está provista de una abertura en toda la extensión de su diámetro o sólo en cierto tramo del mismo, que se abre o cierra mediante compuertas.

- E -

Eclíptica: Es el plano que contiene la órbita de la Tierra alrededor del sol, y también, la línea aparentemente recorrida por el sol a lo largo de un año respecto del fondo inmóvil de las estrellas.

Ecuador celeste: Gran círculo en la imaginaria esfera celeste en el mismo plano que el ecuador y por tanto perpendicular al eje de rotación de la Tierra. En otras palabras, es la proyección del ecuador terrestre en el espacio.

Eje mecánico: Línea imaginaria que define el movimiento físico de la estructura que alberga a un eje óptico.

Eje óptico: Es una línea imaginaria que define el camino por el cual la luz se propaga dentro del sistema óptico.

Eje polar: Proyección del eje polar terrestre hacia la esfera celeste.

Encoder: Codificador de posición, sensor dedicado a la medición de posición.

Equinoccio vernal: Cada uno de los dos puntos de la esfera celeste en los que la eclíptica corta al ecuador celeste.

Error de offset: Desplazamiento del valor de una variable respecto a su valor esperado.

Esfera celeste: Esfera ideal, sin radio definido, concéntrica en el globo terrestre, en la cual aparentemente se mueven los astros. Permite representar las direcciones en que se hallan los objetos celestes; así es como el ángulo formado por dos direcciones será representado por un arco de círculo mayor sobre esa esfera.

- F -

Fricción de rodadura: Es la resistencia que ocurre cuando un objeto circular rueda sobre una superficie.

- G -

Geometría de domo: Parámetros geométricos dentro del sistema móvil y estructura de domo.

- H -

Hardware de observatorio: Dispositivos físicos, frecuentemente electromecánicos y gobernados por el software de observatorio que operan los instrumentos ópticos de un observatorio.

Hemisferio: Cada una de las mitades en que un plano, que pasa por su centro, divide una esfera.

- I -

Inestabilidad: Desborde de una variable que se hallaba dentro de los límites de la estabilidad.

- J -

- K -

- L -

Límites de movimiento: Coordenadas máximas donde pueden llegar los ejes mecánicos del telescopio, también asociados con el horizonte de visión.

- M -

Meridiano: Círculos máximos sobre la esfera terrestre que pasan por los polos. Por extensión, son también los círculos máximos que pasan por los polos de cualquier esfera o esferoide de referencia, en particular, la esfera celeste.

Modelo matemático: Es uno de los tipos de modelos científicos, y se basa en expresar utilizando los instrumentos de la teoría matemática, declaraciones, relaciones, proposiciones sustantivas de hechos o de contenidos simbólicos: están implicadas variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Montura: Montaje (soporte) usado para mover un telescopio o una cámara fotográfica a lo largo de dos ejes perpendiculares de movimiento.

- N -

Nadir: La intersección entre la vertical del observador y la esfera celeste. Es decir, si imaginamos una recta que pasa por el centro de la Tierra y por nuestra ubicación en su superficie, el nadir se encuentra sobre esa recta, por debajo de nuestros pies. En dirección contraria se encuentra el cenit.

Nubosidad: Es la fracción de cielo cubierto con nubes, en un lugar en particular.

- O -

Observatorio: Construcción o lugar destinado al estudio de los cuerpos celestes y del cielo en general.

Operación manual: Alternativa de operación del sistema de control de domo para el usuario mediante una tablilla ó “pad” con botones.

PC de usuario: Computador de escritorio, portátil ó de mano que sirve al usuario del observatorio para supervisión y control.

Polo celestial: Son los dos puntos imaginarios en el cielo donde el eje de rotación de la Tierra “extendido al infinito” interseca la esfera celeste imaginaria.

Posicionado rápido: Es la rotación de un objeto alrededor de un eje y su ubicación rápida en cierto ángulo.

Posición inicial: Tanto en domo como en telescopio es donde se demarca el origen del desplazamiento angular.

Posición de parqueo: Posición donde retorna el domo ó telescopio cuando se finaliza la sesión de observación.

Precisión de rastreo: Apuntamiento del eje óptico del telescopio en relación a la posición del astro observado.

Pseudocódigo: Es una serie de normas léxicas y gramaticales parecidas a la mayoría de los lenguajes de programación, pero sin llegar a la rigidez de sintaxis de estos ni a la fluidez del lenguaje coloquial.

Punto cardinal: Son las cuatro direcciones derivadas del movimiento de rotación terrestre que conforman un sistema de referencia cartesiano para representar la orientación en un mapa o en la propia superficie terrestre.

Reductor mecánico: Conjunto de engranes dispuestos para reducir la velocidad de un eje giratorio en su entrada.

Reflector: Telescopio óptico que utiliza espejos en lugar de lentes para enfocar la luz y formar imágenes.

Refractor: Telescopio óptico que refleja imágenes de objetos lejanos utilizando un sistema de lentes convergentes en los que la luz se refracta.

Resolución de posición: Desplazamiento angular mínimo que puede ejecutar el sistema de control y potencia del domo.

Riel: Cada una de las barras metálicas sobre las que se desplazan las ruedas metálicas.

Rieles electrificados: Es un método de establecer una conexión eléctrica hacia una estructura giratoria. Se los encuentra comúnmente en generadores eléctricos de corriente alterna, alternadores, maquinaria de empaque y turbinas.

- S -

Seguimiento de astro: Movimiento discreto del eje óptico de un telescopio para la observación continua de un astro al cual se mantiene apuntando.

Sesión de observación: Orden de observación de astros en un observatorio.

Software de simulación interactiva de esfera celeste: Paquete de software donde simula el comportamiento de los astros y demás en la esfera celeste, dados los parámetros de ubicación geográfica, zona horaria, etc. Ofrece en algunos casos entorno interactivo para operar un telescopio automatizado.

- T -

Telescopio: Cualquier herramienta o instrumento óptico que permite ver objetos lejanos con mucho más detalle que a simple vista.

Tiempo de exposición: Hace referencia, en fotografía, al tiempo que el obturador permanece abierto, de modo que la película o el sensor (según si se trata de fotografía analógica o digital) recibe luz para la composición de la fotografía.

Tiempo real: Es aquel sistema que interactúa activamente con un entorno con dinámica conocida en relación con sus entradas, salidas y restricciones temporales, para darle un correcto funcionamiento de acuerdo con los conceptos de estabilidad, controlabilidad y alcanzabilidad.

Tiempo sideral local: Es el tiempo medido por el movimiento diurno aparente del equinoccio vernal, que se aproxima, aunque sin ser idéntico, al movimiento de las estrellas. Se diferencia en la precesión del equinoccio vernal con respecto a las estrellas.

Tiempo solar medio: Está basado en un sol ficticio que viaja a una velocidad constante a lo largo del año, y es la base para definir el día solar medio (24 horas u 86.400 segundos). Se corresponde con el tiempo civil y se coordina mediante el Tiempo Medio de Greenwich.

- U -

- V -

Velocidad de desplazamiento: Velocidad angular del domo ó de telescopio con el objetivo de realizar posicionado rápido.

Velocidad de rastreo: Ritmo de pasos de telescopio ó domo en seguimiento de astro.

Visibilidad: Es la capacidad de ver objetos a una determinada distancia. A menor visibilidad peor se verán objetos a la lejanía, mientras que a mayor visibilidad se verán mejor objetos lejanos.

- W -

- X -

- Y -

- Z -

Zona horaria: Son cada una de las veinticuatro áreas en que se divide la Tierra y que siguen la misma definición de tiempo cronométrico.

BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES

- Libros y manuales

ANGULO USATEGUI, José M. "Microcontroladores PIC, diseño práctico de aplicaciones". *Editorial McGraw-Hill*

BOLTON, William. "Ingeniería de control". *Editorial Marcombo, s.a*

CREUS Antonio. "Instrumentación Industrial". *Editorial Marcombo (1998)*

DORF, Richard. "Sistemas de control moderno". *Editorial Pearson Prentice Hall*

INAMHI, "Glosario de términos"

JOHNSON, Curtis. "Process control Instrumentation". *Editorial Prentice-Hall*

KOSOV, Irving. "Máquinas eléctricas". *Editorial Prentice Hall*

KUO, Benjamín. "Sistemas de control automático". *Editorial Pearson Prentice Hall*

MICROCHIP. "Mpsasm Assembler User's Guide".

NISE, Norman. "Sistemas de control para ingeniería". *Editorial C.E.C.S.A.*

ROHRS, Charles. "Sistemas de control lineal". *Editorial McGraw-Hill*

PALLAS, Ramón. "Sensores y acondicionadores de señal". *Editorial Marcombo, s.a*

RASHID, Muhammad. "Electrónica de potencia". *Editorial Pearson Prentice Hall*

SMITH Y CORRIPIO. "Control automático de procesos". *Editorial Limusa (2000)*

UMEZ. "Dinámica de sistemas de control". *Editorial Thomson (2001)*

WOLF, Stanley y SMITH, Richard. "Student reference manual for electronic instrumentation laboratories". *Editorial Pearson Education (2004)*

- Enlaces de Internet

INFORMACION SOBRE LAS INSTALACIONES DEL OBSERVATORIO LA ALAMEDA

<http://oaq.epn.edu.ec>

FUNDAMENTOS SOBRE TELESCOPIOS

<http://www.geologynet.com/astronomy/telescopes2.htm>

<http://www.spacegazer.com>

<http://homepage.mac.com/kvmagruder/bcp/instruments/telescope/index.htm>

ANALISIS ESTRUCTURAL Y CONSTRUCCION DE OBSERVATORIOS

<http://astrho.astro.ufl.edu>

<http://www.homedome.com/info2a.htm>

<http://www.webalice.it/new.millennium/observatory.htm>

<http://www.salt.ac.za/telescope/subsystems/dome>

<http://www.astronomical.com/products.htm>

<http://usuarios.lycos.es/ribosoma/observatorio1.html>

GEOMETRÍA DE DOMO

http://www.brayebrookobservatory.org/BrayObsWebSite/HOMEPAGE/PageMill_Resources/PUBLICATIONS/dome_synchronisation.pdf

SEGUIMIENTO DE ASTROS

<http://oalm.astronomia.edu.uy>

http://www.espacioprofundo.com.ar/vercategoria/Primeros_Pasos.html

SISTEMAS DE CONTROL EN OBSERVATORIOS

http://www.dfmengineering.com/telescope_control_system.html

<http://www.astro.uson.mx/index.htm>

<http://www.laestrellitaobservatory.org/index.html>

<http://astro.tsuniv.edu>

<http://www.brayebrookobservatory.org>

SOFTWARE VINCULADO Y PROGRAMACION

<http://www.kollar.com>

<http://www.bisque.com>

<http://www.homedome.com>

<http://www.carinasoft.com>

<http://omegalab.port5.com>

DISPOSITIVOS DE POTENCIA

<http://www.technosoftmotion.com>

<http://www.mercotac.com/html/slip-ring.html>

<http://www.observatory.org/install.htm>

INSTRUMENTACION

<http://www.astrosurf.com>

<http://www.physics.uwyo.edu>

<http://www.arcetri.astro.it/pubblicazioni/GenReport/Rapp1996/node8.html>

METEOROLOGÍA

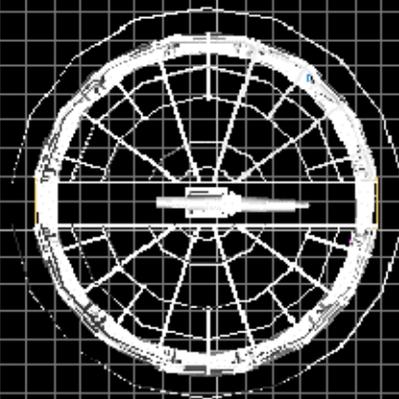
<http://www.inamhi.com>

http://www.cyanogen.com/support/tech_main.htm

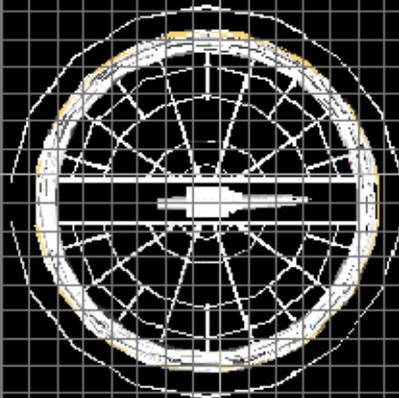
ANEXOS

ANEXO A

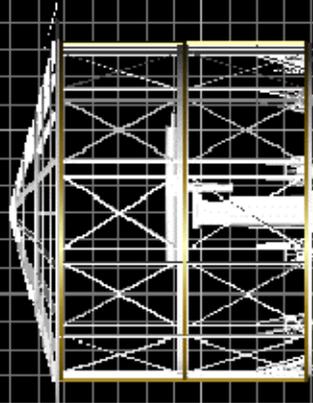
PLANOS 3D DEL OBSERVATORIO EN AUTOCAD



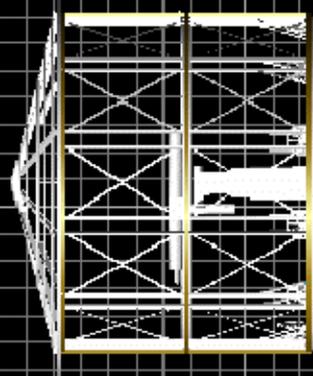
VISTA SUPERIOR



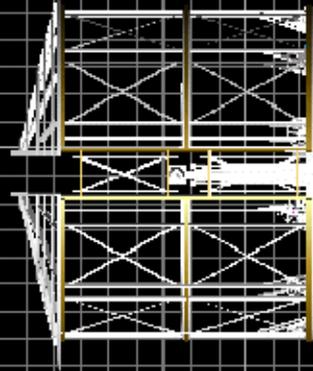
VISTA INFERIOR



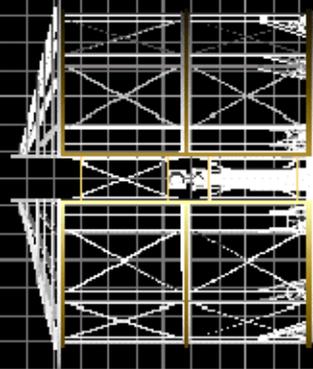
VISTA IZQUIERDA



VISTA DERECHA



VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR

PROYECTOR OBSERVATORIO LA ALAMEDA	
— Departamento	Nº
— Escuela	GRUPO DE LA ALAMEDA
— Curso	01
— Fecha	15/05/2015
— Nombre	...

ANEXO B

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DEL OBSERVATORIO

LATACUNGA, 4 de Diciembre 2006.						
Sr. IVAN GALLARDO.						
Estudiante de Ingeniería Electrónica de la ESPE. LATACUNGA.						
Presente.						
Por medio de la presente, hago llegar a Ud. el cálculo de volúmenes y peso de la cúpula del observatorio Astronómico de La Alameda.						
OBRA: CALCULO DE VOLUMENES DE LA ESTRUCTURA DE ACERO DEL OBSERVATORIO						
CALCULO: ARQ. GERMAN HIDALGO Z. Telf.2863-408 095784610						
FECHA: 4 de Diciembre 2006						
TABLA DE CANTIDADES DE VOLUMENES						
ITEM	CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD	VOL. UNITARIO	VOL. TOTAL	
	CUBIERTA					
1	Planchas de Zinc	34,00	U	0,00083	0,02815	
2	IPE 134mm acero de refuerzo vigas cubierta	22,00	U	0,00506	0,11136	
3	Angulos 62mm espesor 11mm	1,00	global	0,04080	0,04080	
	PAREDES					
4	Paneles, con ángulos de 62mm 5.12 m e= 11 mm	24,00	U	0,00614	0,14746	
5	Crucetas 2.71 m 5.2 cm. e = 7mm	48,00	U	0,00099	0,04735	
6	Platinas y ángulos a media altura de 62mm e= 8mm	6,00	U	0,01460	0,08760	
7	Angulos de refuerzo de la base a los largueros	28,00	U	0,00202	0,05658	
8	Anillo metálico sobre riel de 34 cm. alto 12 cm. e=11mm	1,00	U	0,14130	0,14130	
	RUEDAS					
9	Ruedas metálicas con brazos radiales con bridas	6,00	U	0,01389	0,08336	
	ELEMENTOS DE MADERA					
10	Alfajías, vigas y listones de madera tipo "A"	1,00	global	0,53480	0,53480	
	SUB TOTAL ACERO				0,74395	
	SUB TOTAL MADERA				0,53480	
	PESO TOTAL DE ACERO			7250 Kg.m3	5393,6375	
	PESO TOTAL DE MADERA			1100 Kg.m3	588,28	
	PESO TOTAL DE ESTRUCTURA				5981,9175	
SON: CINCO MIL NOVECIENTOS OCHENTA Y UN KILOGRAMOS CON 92/100						
Por la acogida que de a la presente me suscribo, atentamente						
ARQ. GERMAN HIDALGO Z.						
DOCENTE ESPEL						

ANEXO C

FOTOGRAFÍAS DE LAS INSTALACIONES DEL OBSERVATORIO



Edificio del Observatorio
Parque La Alameda



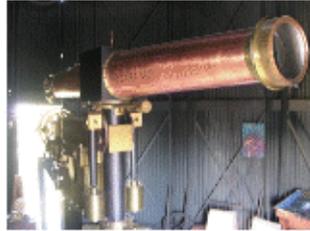
Maqueta del Observatorio



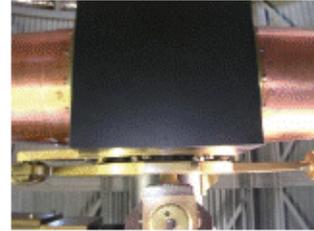
Torre adyacente al domo



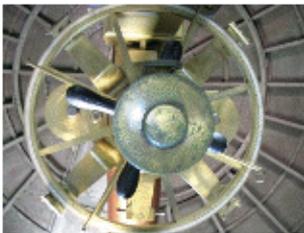
Telescopio refractor
Merz vista posterior



Telescopio refractor Merz
vista frontal



Base del tubo de telescopio



Vista inferior del eje de
declinación



Vista posterior del eje de
ascensión recta



Posición del telescopio para
apuntar a un astro



Mira principal con auxiliar
buscador de astros (izq.)



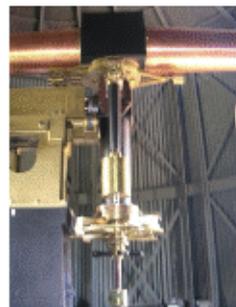
Vista lateral del telescopio
auxiliar buscador



Vista superior del telescopio



Lente principal del
telescopio



Vista ampliada de
ejes



Parte superior de
montura



Vista posterior de
telescopio



Vista lateral de montura



Vista frontal de montura



Juego de engranes para mover domo



Rueda metálica de domo



Vista superior de juego de engranes primer par



Juego de engranes segundo par



Rueda asentada sobre riel metálico



Tornillo sinfín para abrir compuerta superior 1



Tornillo sinfín para abrir compuerta superior 2



Ancho de apertura lateral y ancho de lente principal



Uniones entre crucetas metálicas en paredes



Rieles en estructura que conforman el techo



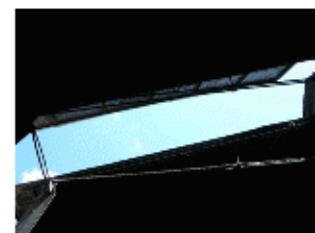
Rieles que conforman el techo



Polea de apertura de techo



Riel y arnés del techo



Apertura superior



Crucetas en pared



Escalera hacia techo



Escalera hacia techo



Techo del domo



Puerta lateral de domo



Vista ampliada de puerta lateral



Láminas de zinc de las paredes



Base de concreto del observatorio



Escalinata circular de entrada al domo



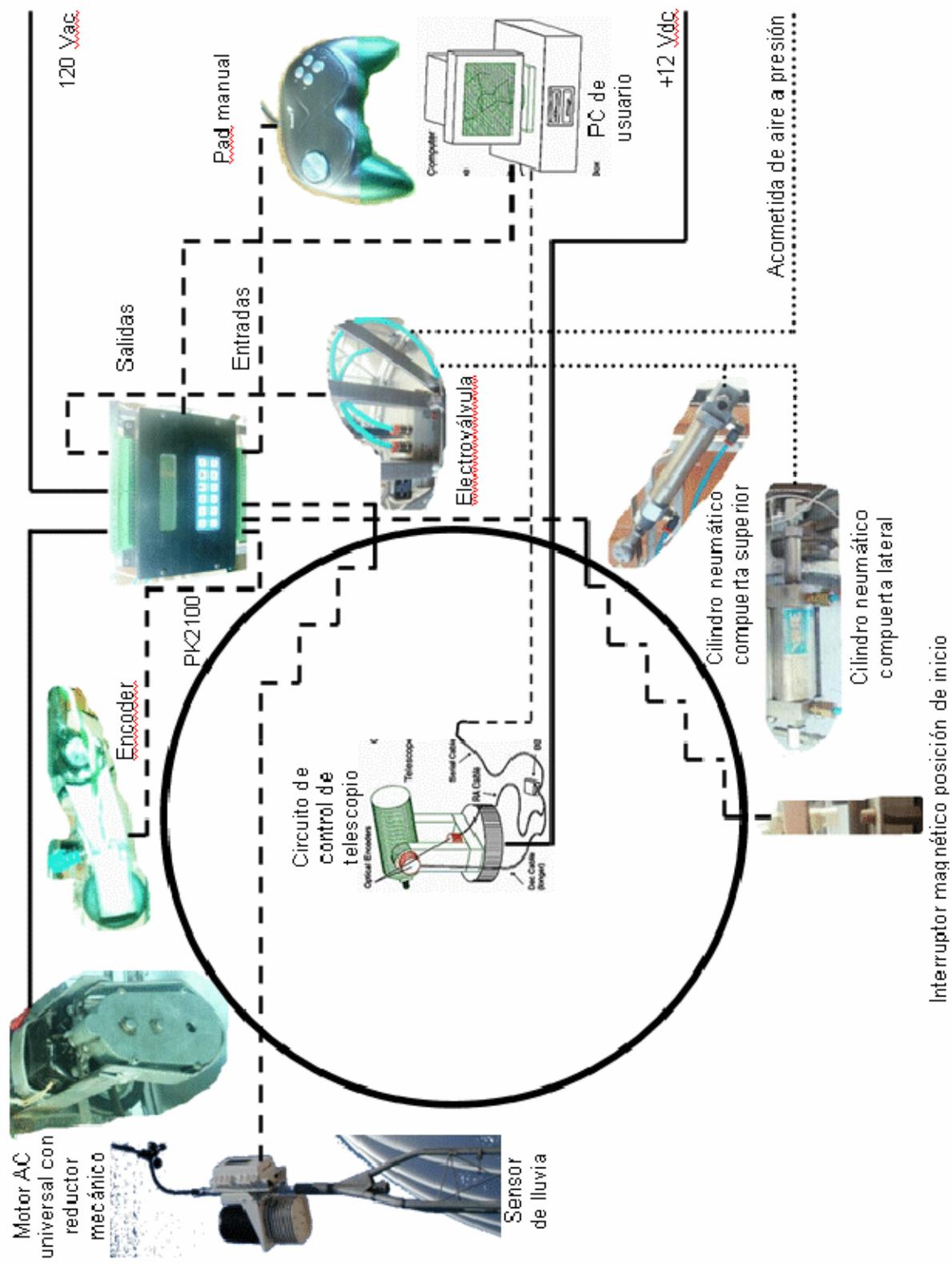
Piso de madera del domo



Tubería por donde ingresa energía eléctrica al domo

ANEXO D

**ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL CIRCUITO DE CONTROL Y
POTENCIA DEL PROTOTIPO**



ANEXO E

PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PK2100

CNTPGLCD.C

```
#use "default.h"
```

```
#use cplc.lib
```

```
##if !(BOARD_TYPE==CPLC_BOARD || BOARD_TYPE==L_STAR)
```

```
##fatal "This program only runs on a PK21xx/Rugged Giant or a PK22xx/Little Star"
```

```
##endif
```

```
main()
```

```
{
```

```
    unsigned count0, count1;
```

```
    unsigned old0, old1;
```

```
    float x,y;
```

```
    float c[8];
```

```
    int n;
```

```
    uplc_init();
```

```
    old0 =count0=old1=count1;
```

```
    DMA1Count(8);
```

```
    while (1)
```

```
    {
```

```
        lcd_erase();
```

```
        up_beep(100);
```

```
        OUT8=1;
```

```
    while (!_DMAFLAG1)
```

```
    {
```

```
        runwatch();
```

```
        DMASnapShot(1, &count1);
```

```
        if (old1 != count1)
```

```
        {
```

```
            runwatch();
```

```
            old1 = count1;
```

```
            lcd_printf(0x00000000L,"Azimut domo %.2f ", count1*45 +
```

```
count0/1.8);
```

```
            printf("Azimut domo %.2f\n", count1*45 + count0/1.8);
```

```
                if (old1 == 2)
```

```
                {
```

```
                    DMA0Count(162);
```

```
                    while (!_DMAFLAG0)
```

```
                    {
```

```
                        DMASnapShot(0, &count0);
```

```

        if (old0 != count0)
            {
                runwatch();

                lcd_printf(0x00000000L,"Azimut domo %.2f",count1*45
+ count0/1.8);

                printf("Azimut domo %.2f\n",count1*45 + count0/1.8);
                old0 = count0;

                c[0]=0.03038;
                c[1]=0.83;
                c[2]=1.9195*pow10(-3);
                c[3]=-3.9774*pow10(-5);
                c[4]=4.5708*pow10(-7);
                c[5]=-2.2088*pow10(-9);
                c[6]=4.7248*pow10(-12);
                c[7]=-3.7499*pow10(-15);

                x=count1*45 + count0/1.8;
                n=7;
                y=poly(x,n,c);
                lcd_printf(0x01000000L,"Az.telescopio %.2f",y);
                printf("Azimut telescopio %.2f\n",y);

                if (y>115)
                    {
                        OUT8=0;

                        _DMAFLAG0 = 0;
                        _DMAFLAG1 = 0;

                        up_beep(500);
                        break;
                    }
            }
        }
    }
}
if (_DMAFLAG0)
{
    runwatch();

    _DMAFLAG0 = 0;

```

```
DMA0Count(162);
_DMAFLAG1 = 0;
DMA1Count(8);
lcd_erase();
}
  if(_DMAFLAG1)
{
    runwatch();

    _DMAFLAG0 = 0;
    DMA0Count(162);
    _DMAFLAG1 = 0;
    DMA1Count(8);
    lcd_erase();
}
}
}
```

ANEXO F

PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC18F2550

USB_PASOS.BAS

```
Device = 18F2550
XTAL = 48
USB_DESCRIPTOR = "USB_PASOSDESC.inc"
@config_req
@pll_req
  @__config config1l , Plldiv_3_1 & Cpudiv_1_1 & Usbdiv_2_1
  @__config config1h , Fosc_hsp1l_hs_1
@watchdog_req
  @__config config2h , Wdt_off_2 & Wdtps_128_2
@debug_req
  @__config config4l , Lvp_off_4 & Icp1t_off_4 & Xinst_off_4 &
Debug_off_4
  @__config config3h , Pbaden_off_3
Symbol USBBufferSizeMax = 8
Symbol USBBufferSizeTX = 8
Symbol USBBufferSizeRX = 8
Dim USBBuffer[USBBufferSizeMax] As Byte
Dim PPO As Byte SYSTEM
Symbol CARRY_FLAG = STATUS.0
Symbol ATTACHED_STATE = 6
Dim i As Word
Dim var_usb As Byte
Dim var_usb_sal As Byte
Dim var_usb_sal_2 As Byte
GoSub AttachToUSB
TRISB=0
PORTB=0
Repeat
  GoSub DoUSBIn
  var_usb=USBBuffer[5]
Until var_usb=10
PORTB=255
For i=1 To 500
  DelayMS 1
  USBPoll
Next
PORTB=0
var_usb_sal=50
var_usb_sal_2=0
ProgramLoop:
  GoSub DoUSBIn
  var_usb=USBBuffer[5]
  Select Case var_usb
    Case 5:
      Repeat
        PORTB=%00000011
        GoSub tiempo
        GoSub salida
        PORTB=%00000110
        GoSub tiempo
        GoSub salida
        PORTB=%00001100
        GoSub tiempo
        GoSub salida
        PORTB=%00001001
        GoSub tiempo
        GoSub salida
      Until var_usb=10
    Case 10:
      GoTo ProgramLoop
    Case 15:
```

```

Repeat
  PORTE=%00001001
  GoSub tiempo
  GoSub salida2
  PORTE=%00001100
  GoSub tiempo
  GoSub salida2
  PORTE=%00000110
  GoSub tiempo
  GoSub salida2
  PORTE=%00000011
  GoSub tiempo
  GoSub salida2
Until var_usb=10
Case 50:
Repeat
  PORTE=%00110000
  GoSub tiempo
  GoSub salida3
  PORTE=%01100000
  GoSub tiempo
  GoSub salida3
  PORTE=%11000000
  GoSub tiempo
  GoSub salida3
  PORTE=%10010000
  GoSub tiempo
  GoSub salida3
Until var_usb=10
Case 150:
Repeat
  PORTE=%10010000
  GoSub tiempo
  GoSub salida4
  PORTE=%11000000
  GoSub tiempo
  GoSub salida4
  PORTE=%01100000
  GoSub tiempo
  GoSub salida4
  PORTE=%00110000
  GoSub tiempo
  GoSub salida4
Until var_usb=10
Case 25:
Repeat
  PORTE=%00000011
  GoSub tiempo2
  GoSub salida
  PORTE=%00000110
  GoSub tiempo2
  GoSub salida
  PORTE=%00001100
  GoSub tiempo2
  GoSub salida
  PORTE=%00001001
  GoSub tiempo2
  GoSub salida
Until var_usb=10
End Select
GoTo ProgramLoop

```

```

tiempo:
  For i=1 To 30
    GoSub DoUSBIn
    var_usb=USBBuffer[5]
    If var_usb=10 Then
      PORTB=0
      GoTo ProgramLoop
    EndIf
  Next
Return
tiempo2:
  For i=1 To 432
    GoSub DoUSBIn
    var_usb=USBBuffer[5]
    If var_usb=10 Then
      PORTB=0
      GoTo ProgramLoop
    EndIf
  Next
Return
salida:
  If var_usb_sal<1 Then
    PORTB=0
    var_usb_sal=1
    GoTo ProgramLoop
  Else If var_usb_sal>99 Then
    PORTB=0
    var_usb_sal=99
    GoTo ProgramLoop
  EndIf
  Inc var_usb_sal
  USBPoll
  USBBuffer[6]=var_usb_sal
  GoSub DoUSBOut
Return
salida2:
  If var_usb_sal<1 Then
    PORTB=0
    var_usb_sal=1
    GoTo ProgramLoop
  Else If var_usb_sal>99 Then
    PORTB=0
    var_usb_sal=99
    GoTo ProgramLoop
  EndIf
  Dec var_usb_sal
  USBPoll
  USBBuffer[6]=var_usb_sal
  GoSub DoUSBOut
Return
salida3:
  If var_usb_sal_2>199 Then
    PORTB=0
    var_usb_sal_2=0
    GoTo ProgramLoop
  End If
  Inc var_usb_sal_2
  USBPoll
  USBBuffer[4]=var_usb_sal_2
  GoSub DoUSBOut
Return

```

```

salida4:
If var_usb_sal_2<1 Then
    PORTB=0
    var_usb_sal_2=200
    GoTo ProgramLoop
    End If
Dec var_usb_sal_2
USBpoll
    USBBuffer[4]=var_usb_sal_2
    GoSub DoUSBOut
    Return
DoUSBIn:
    USBIn 1, USBBuffer, USBBufferSizeRX, DoUSBIn
Return
DoUSBOut:
    USBOut 1, USBBuffer, USBBufferSizeTX, DoUSBOut
Return
AttachToUSB:
    Repeat
        USBpoll
    Until PPO = ATTACHED_STATE
Return

```

USB_PASOS.VBP

```
Private Const VendorID = 6017
Private Const ProductID = 2000
Private Const BufferInSize = 8
Private Const BufferOutSize = 8
Dim BufferIn(0 To BufferInSize) As Byte
Dim BufferOut(0 To BufferOutSize) As Byte
Dim conversion As Integer
Dim conversion2 As Integer
Dim temp As Double
```

```
Private Sub cmd_autog_Click()
BufferOut(6) = 25
WriteSomeData
End Sub
```

```
Private Sub cmd_m1der_Click()
BufferOut(6) = 15
WriteSomeData
End Sub
```

```
Private Sub cmd_m1izq_Click()
BufferOut(6) = 5
WriteSomeData
End Sub
```

```
Private Sub stop_general_Click()
BufferOut(6) = 10
WriteSomeData
End Sub
```

```
Private Sub cmd_m2der_Click()
BufferOut(6) = 150
WriteSomeData
End Sub
```

```
Private Sub cmd_m2izq_Click()
BufferOut(6) = 50
WriteSomeData
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
ConnectToHID (Me.hwnd)
BufferOut(6) = 10
WriteSomeData
Timer1.Enabled = True
End Sub
```

```
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
DisconnectFromHID
End Sub
```

```

Public Sub OnPlugged(ByVal pHandle As Long)
    If hidGetVendorID(pHandle) = VendorID And hidGetProductID(pHandle) = ProductID
    Then

        End If
    End Sub

Public Sub OnUnplugged(ByVal pHandle As Long)
    If hidGetVendorID(pHandle) = VendorID And hidGetProductID(pHandle) = ProductID
    Then

        End If
    End Sub

Public Sub OnChanged()
    Dim DeviceHandle As Long
    DeviceHandle = hidGetHandle(VendorID, ProductID)
    hidSetReadNotify DeviceHandle, True
End Sub

Public Sub OnRead(ByVal pHandle As Long)
    If hidRead(pHandle, BufferIn(0)) Then
conversion = BufferIn(7)
Text1 = ((3 * (conversion - 50)) / 25)
conversion2 = BufferIn(5)
temp = (conversion2 * 9 / 5)
Text2 = 90 * (Cos(temp * 3.141592 / 180))
    End If
End Sub

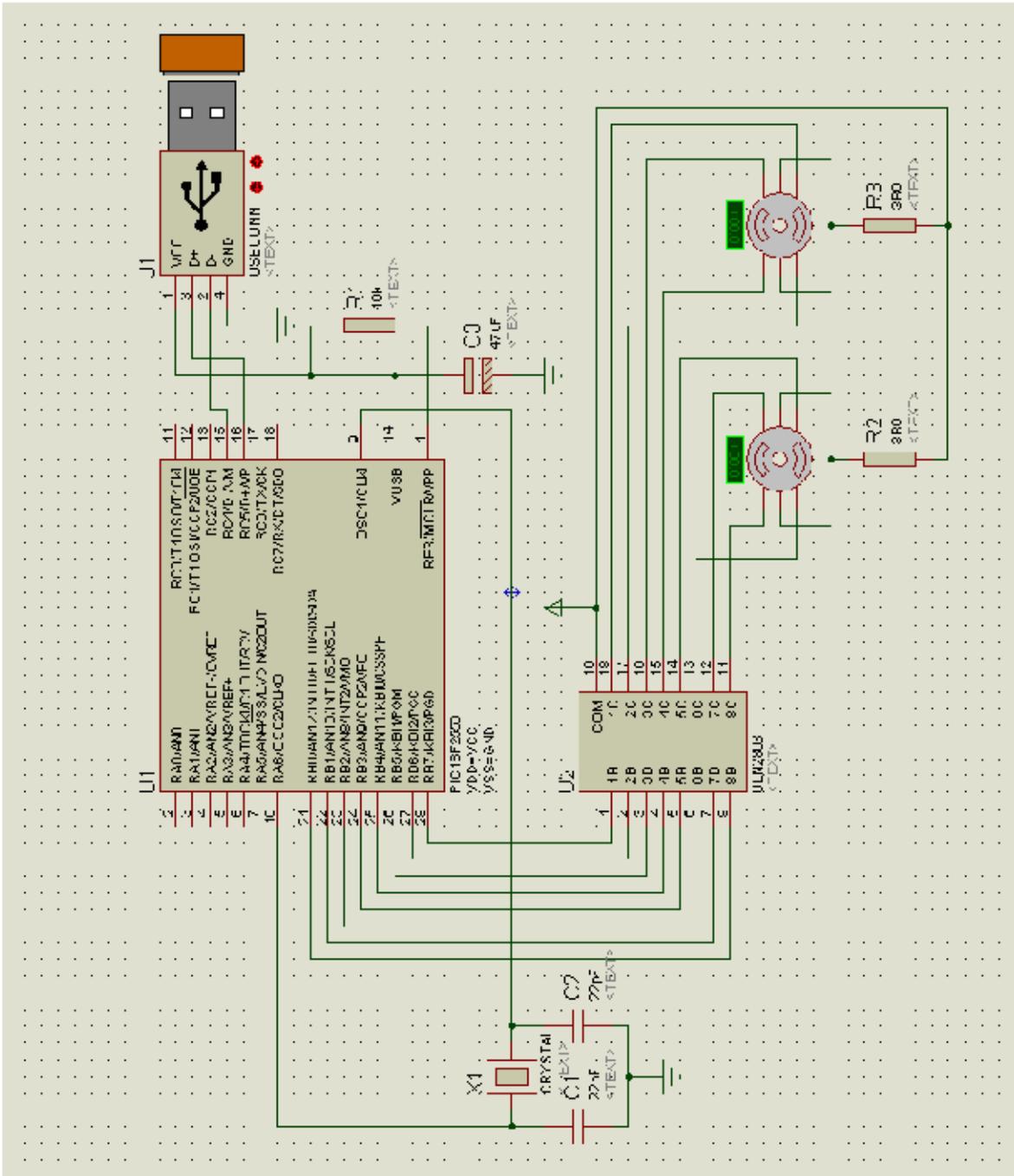
Public Sub WriteSomeData()
    BufferOut(1) = 10
    hidWriteEx VendorID, ProductID, BufferOut(0)
End Sub

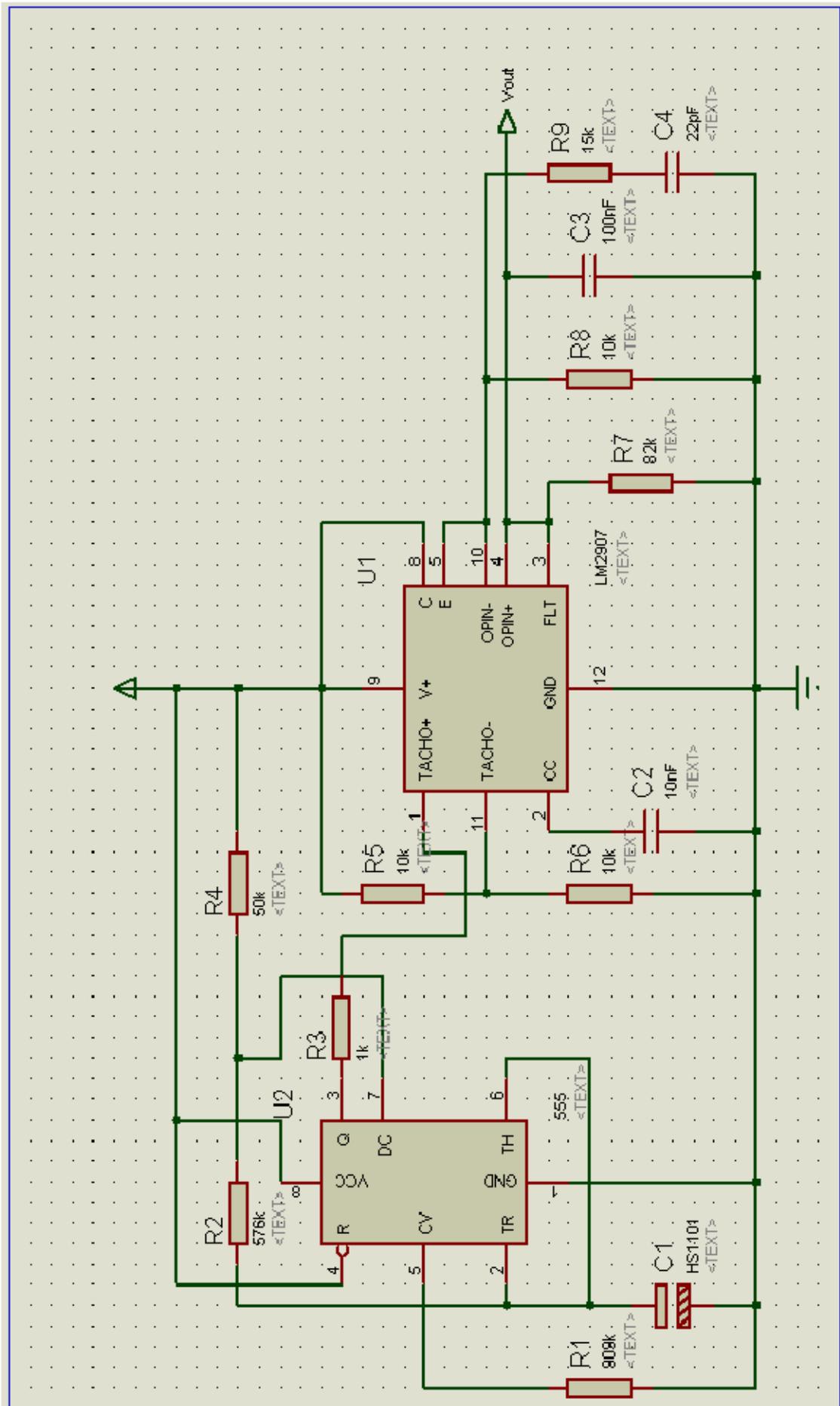
Private Sub Timer1_Timer()
    BufferOut(6) = 1
    WriteSomeData
End Sub

```

ANEXO G

DIAGRAMAS ELÉCTRICOS EN CIRCUITOS DE CONTROL DE TELESCOPIO Y DE DETECCIÓN DE LLUVIA





ANEXO H

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL PROTOTIPO

El microcontrolador PK2100 de Z-World

El microcontrolador industrial de propósito general de la firma Z-World que emplearemos en la práctica es el modelo PK2100. Está basado en el microprocesador Z180 de Zilog de 8 bits. Este microcontrolador se emplea para sistemas en entornos industriales y domésticos. Algunas de las aplicaciones pueden ser el control de maquinaria de empaquetado o sistemas de procesamiento de material, detección de contactos, contador de pulsos o medición de valores analógicos como temperatura, presión o posición (caso de nuestra práctica). Ofrece la posibilidad de ser conectado directamente a sensores y dispositivos periféricos.

1.1 Descripción técnica

- Frecuencia de reloj: 6,144 MHz.
 - La memoria EPROM o FLASH puede ser desde 32K hasta 128K.
 - La capacidad de memoria RAM puede ser desde 32K hasta 512K.
 - Alimentación con una fuente de 24 voltios y consume aproximadamente 5,5 W.
 - Toda la aritmética flotante debe realizarse haciendo uso de funciones programadas porque el hardware es de únicamente 8 bits. Por tanto, operaciones como multiplicaciones de flotantes en 32 bits son operaciones muy costosas en cuanto a tiempo de ejecución.
- Interfaces:
- 6 entradas universales que pueden ser usadas como entradas digitales o entradas analógicas. El rango de tensión de entrada es desde 0 a 10 V con 10 bits de resolución y una protección contra sobretensiones de ± 48 voltios.
 - Una entrada analógica diferencial con rango de 0 a 10 V con 10 bits de resolución.
 - 7 entradas digitales, pudiendo funcionar 3 de ellas como contadores.
 - 2 canales para usar como entrada a contadores.
 - 2 salidas a relés con intensidad de 3A a 48V.
 - 10 salidas de corriente para dirigir relés o solenoides.
 - 1 salida analógica que puede ser en tensión (0 a 10 V) o en corriente (0 a 20 mA).
 - Un puerto paralelo RS485/RS422 y un puerto serie RS232.
 - Un bus de expansión para dispositivos PCL-BUS de ZILOG.

La tarjeta que reúne todos los circuitos que componen el microcontrolador se muestra en la figura 1

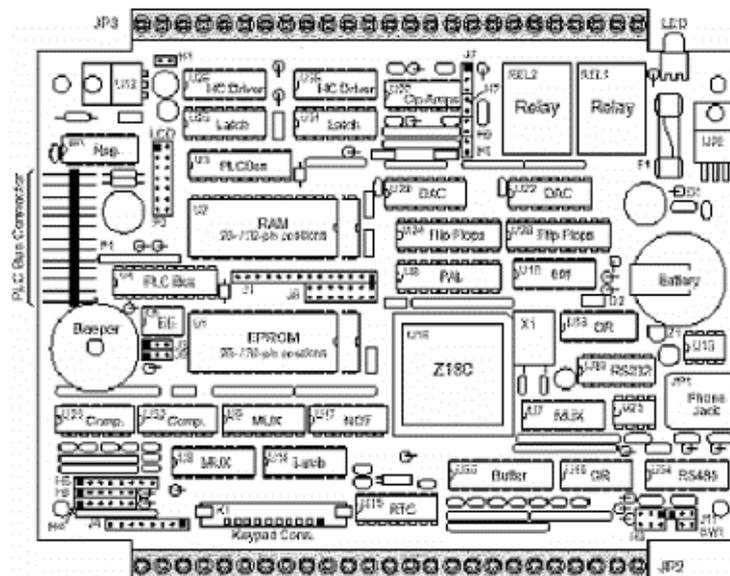


Figura 1. Placa del microcontrolador industrial PK2100.

Conexión del controlador PK2100 al PC.

Para llevar a cabo la conexión del controlador PK2100 al PC donde se ejecuta el software de desarrollo Dynamic-C, se deben realizar las siguientes tareas:

- Conectar el cable rojo (o negro(-) y blanco(+)) de la fuente de alimentación de 24 V DC al conector atornillable marcado con las letras "+24". Conectar el otro cable de la fuente al conector atornillable marcado con las letras "GND" dos posiciones por debajo del primero. Todos los conectores atornillables marcados con "GND" están unidos eléctricamente.
- Comprobar que el controlador no tiene tensión (fuente no conectada a toma de red).
- Conectar el controlador al puerto serie del PC (COM) mediante el cable serie y el adaptador RJ-DB9 que se proporcionan.
- Conectar la fuente de alimentación a una toma de red y arrancar en el PC el software de desarrollo Dynamic-C. Comprobar que el puerto configurado en la aplicación Dynamic-C ("*Serial*" en el menú), tiene la misma velocidad que la indicada en la configuración del PC.

En este momento el controlador está listo para ser programado. La comunicación entre el PC y el microcontrolador comienza cuando se arranca en el PC el programa Dynamic-C. Nótese que el PC intenta comunicarse con el controlador cada vez que se comienza a ejecutar el software. Si el controlador no está presente o no se le ha dado tensión se mostrará el siguiente mensaje de error por pantalla: "*Target not responding*"

2.1 Situación de los conectores atornillables

En la figura 2 se puede observar la configuración de la tarjeta del controlador para cada uno de los conectores atornillables. De esta forma, aparecen los conectores para las entradas universales, la salida analógica, así como para los conectores de entrada y salida adicionales (AVD+ y UEXP respectivamente). Todos los conectores marcados con "GND" están unidos eléctricamente y es en ellos donde deben conectarse los polos comunes de cada entrada y de salida.

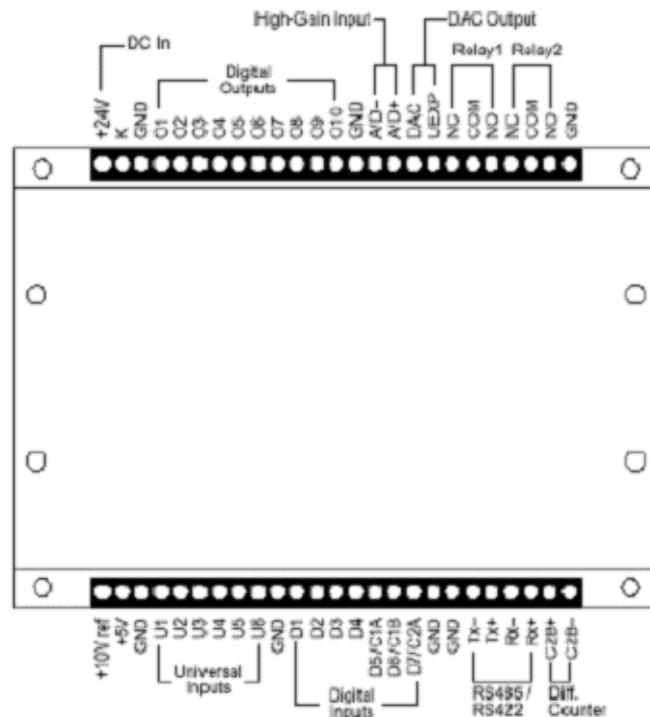


Figura 2. Situación de los conectores atornillables y las entradas y salidas.

2.2 Situación de los puentes de configuración (*Jumpers* y *Headers*) en el controlador.

Para esta práctica sólo hay que comprobar el jumper J1. Si el microprocesador lleva una memoria EPROM, se deben conectar los pines 4-5 y 8-9. Si el microcontrolador lleva una memoria FLASH, se deben conectar los pines 7-8 y 12-13.

Programación del PK2100

El PK2100 se programa a través del puerto serie RS232. Este debe ser conectado al puerto serie de un IBM PC o compatible en el que se tenga instalada la aplicación Dynamic-C 5.25 de Z-world, usado para desarrollar los programas. Se van a emplear las librerías que proporciona este software de desarrollo para el manejo de las entradas/salidas. La programación es en lenguaje C ya que éste genera un código compacto y eficiente de alto nivel que permite también utilizar el código máquina. Las funciones principales de Dynamic C son la Edición, Compilación, Lincado, Carga y Depuración del código que genera el usuario. Los programas se compilan, lincan y descargan en la memoria del microcontrolador en un solo paso. También se permite compilar generando un fichero ejecutable sin necesidad de tener conectado el microcontrolador.

A continuación se detallan algunas diferencias entre Dynamic-C y el lenguaje C, que ayudarán a solucionar y/o evitar errores de programación:

- Las variables que al ser declaradas son inicializadas se consideran constantes almacenándose en memoria ROM y por tanto se considera un error el intentar cambiar su valor.
- El modo de almacenamiento por defecto es static y no auto como en el estándar.
- No existe la directiva #include sino #use.
- Dynamic-C no soporta el tipo enumerado.
- Las palabras reservadas extern y register tienen un significado diferente.
- Se permite incluir instrucciones en ensamblador intercaladas en el código.
- Dynamic-C permite la simulación de tareas ejecutándose "en paralelo" en un mismo programa usando una estructura denominada costatement. Las tareas programadas así son multiplexadas en el tiempo de ejecución. Esto se denomina Procesamiento Concurrente

3.1 Procesamiento Concurrente

El procesamiento concurrente puede ser muy interesante en el caso de tener controladores conectados a varios dispositivos externos. El hecho de usar programación multitarea para controlar un sistema de estas características, permite la posibilidad de pensar en el control de cada dispositivo por separado haciendo más fácil el proceso de desarrollo. Dynamic C proporciona dos tipos de programación multitarea para desarrollar aplicaciones: cooperativa (costatements) y por prioridad (preemptive).

- Cooperativa (costatements): en un entorno de programación multitarea cooperativa cada tarea abandona voluntariamente el control para que otra tarea entre a ejecutarse. En este caso no es necesario tener un "kernel" o núcleo para controlar el proceso puesto que las tareas colaboran entre sí. Esta filosofía presenta las ventajas de que es más fácil la comunicación entre las tareas, es más fácil predecir la interacción entre las tareas y su programación es muy simple.

- Por prioridad (preemptive): en este caso las tareas son interrumpidas. Una tarea deja el control a favor de otra que entra a ejecutarse. Una tarea es sustituida por otra que puede tener más prioridad. Las tareas no tienen control del momento en que serán sustituidas. En esta filosofía se necesita un núcleo o kernel que para y da entrada a las tareas. Normalmente se usa un timer para generar el periodo durante el que está activa una tarea. Por el hecho de que las tareas no controlan el momento en que son interrumpidas se debe tener cuidado al usar variables compartidas. La comunicación entre tareas es el mayor problema.

3.1.1 El recurso Costatement

El recurso de la estructura "costatement" proporciona la posibilidad de generar código que se ejecuta hasta que encuentra un punto donde es necesario esperar a la ocurrencia de un evento o esperar simplemente un determinado intervalo de tiempo. El hecho de esperar conlleva el acto de conmutar de tarea para pasar a ejecutar otra. La conmutación entre tareas se puede llevar a cabo mediante las siguientes funciones y comandos que proporciona el software:

- `Waitfor()` : a la espera de un evento o cuando es necesario detener la ejecución de la tarea durante un determinado intervalo de tiempo. Sólo se continúa ejecutando la tarea cuando la condición que se da como parámetro se ha cumplido. Sólo puede usarse dentro de una estructura `costatement`.

- `Yield` : provoca la conmutación inmediata de tarea.

- `Abort` : finalización de la tarea.

Cuando tenemos más de una tarea, una forma más práctica de resolver este tipo de problemas es usar una estructura de bucle más amplia donde cada tarea puede ceder el control a otra tarea cuando deba esperar. Se consigue así aprovechar de forma más eficiente la capacidad de proceso. El resultado es que cada tarea se ejecuta en los tiempos de espera de las demás tareas. Con la función `waitfor()` se comprueba si se cumple la condición que se da como parámetro y, si no es así, se conmuta a otra tarea. Cuando la tarea es retomada se vuelve por el punto en el código donde se quedó ejecutando cuando se conmutó y se vuelve a comprobar la condición y si es el caso se continúa ejecutando.

3.1.2 Driver virtual

El driver virtual que proporciona Dynamic-C consta de un conjunto de funciones que proporcionan una serie de servicios. Entre ellos están la inicialización global del sistema y las interrupciones periódicas de los timer. Una llamada a la función `Vdlnit` debe ser hecha al comienzo de la ejecución. De esta forma se inicializan todos los recursos del sistema así como las estructuras de datos necesarias (Codata) correspondientes a la `costatement` definidas si las hay. Para poder invocar a las funciones del driver virtual deben incluirse en código la librería `vdriver.lib`, la librería `pk21xx.lib` del micro PK2100 y la librería `drivers.lib`.

3.1.3 Tiempo de muestreo

Para determinar el tiempo mínimo de muestreo (P_{min}), se debe calcular el tiempo máximo que tarda en ejecutarse el bucle del PID programado. Una forma sencilla de calcularlo es estimando la ejecución del bucle durante por ejemplo 10 s y contabilizar el número veces que se ejecuta el bucle PID. Dividiendo obtenemos una estimación de P_{min} .

3.1.4 Aplicación

Desde la pantalla principal del entorno de desarrollo se abre el menú *File* y se selecciona *New*. En pantalla aparece una ventana de edición de texto donde escribir el código del programa. A continuación compilamos el programa pulsando F3 o seleccionando *Compile to Target* dentro del menú *Compile*. Dynamic-C compila el programa y lo descarga automáticamente en la RAM del controlador. Ahora se puede ejecutar el programa pulsando F9 o seleccionando *Run* del menú *Run*. Durante la ejecución del programa se puede pulsar `Ctrl+Z` para detener la ejecución. Pulsando de nuevo F9 se continúa la ejecución. También se puede resetear el controlador pulsando `Ctrl+Y` o seleccionando *Reset Target* dentro del menú *Run*. Para volver a modificar un programa ya compilado y cargado en el microcontrolador, seleccionamos en el menú *Edit Mode*. Si no tenemos el micro conectado, se puede generar el ejecutable en el PC con *Compile to File*.

Una vez desarrollados, los programas pueden residir en tres soportes distintos:

- RAM con soporte de batería.
- ROM, programada aparte y que sustituya a la ROM estándar de Z-world.
- Memoria FLASH que puede ser reprogramada sin necesidad de ser extraída de la tarjeta.

NOTA: Durante la ejecución de los algoritmos el microcontrolador permanece conectado físicamente al PC.

4 Conexión del microcontrolador al sistema y puesta en marcha.

Para realizar este conexionado, se debe seguir el esquema de la figura 4.

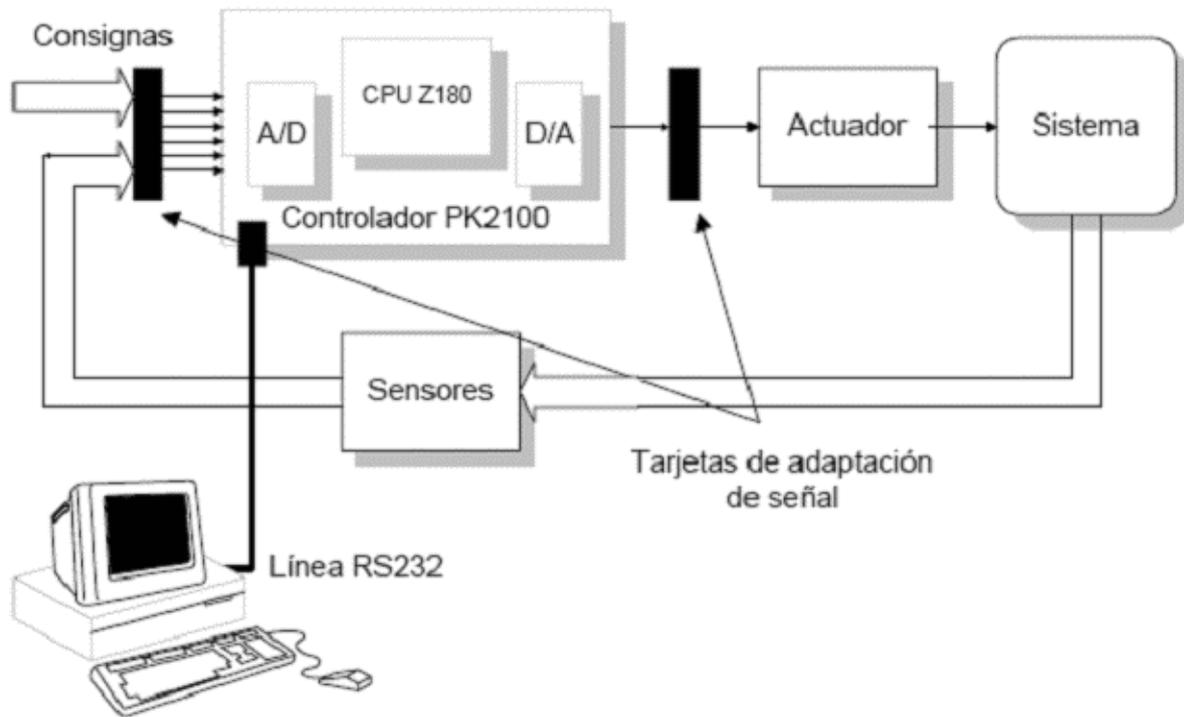
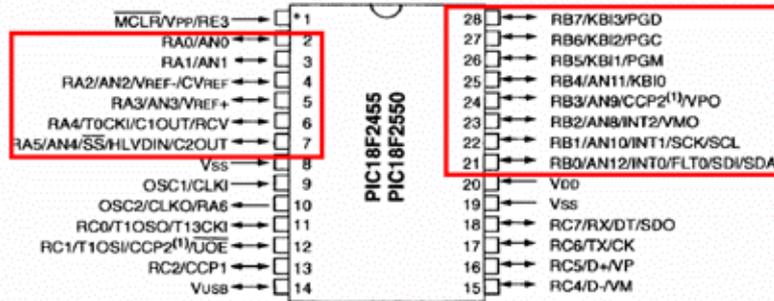


Figura 4. Diagrama del sistema en bucle cerrado.

PIC18F2550

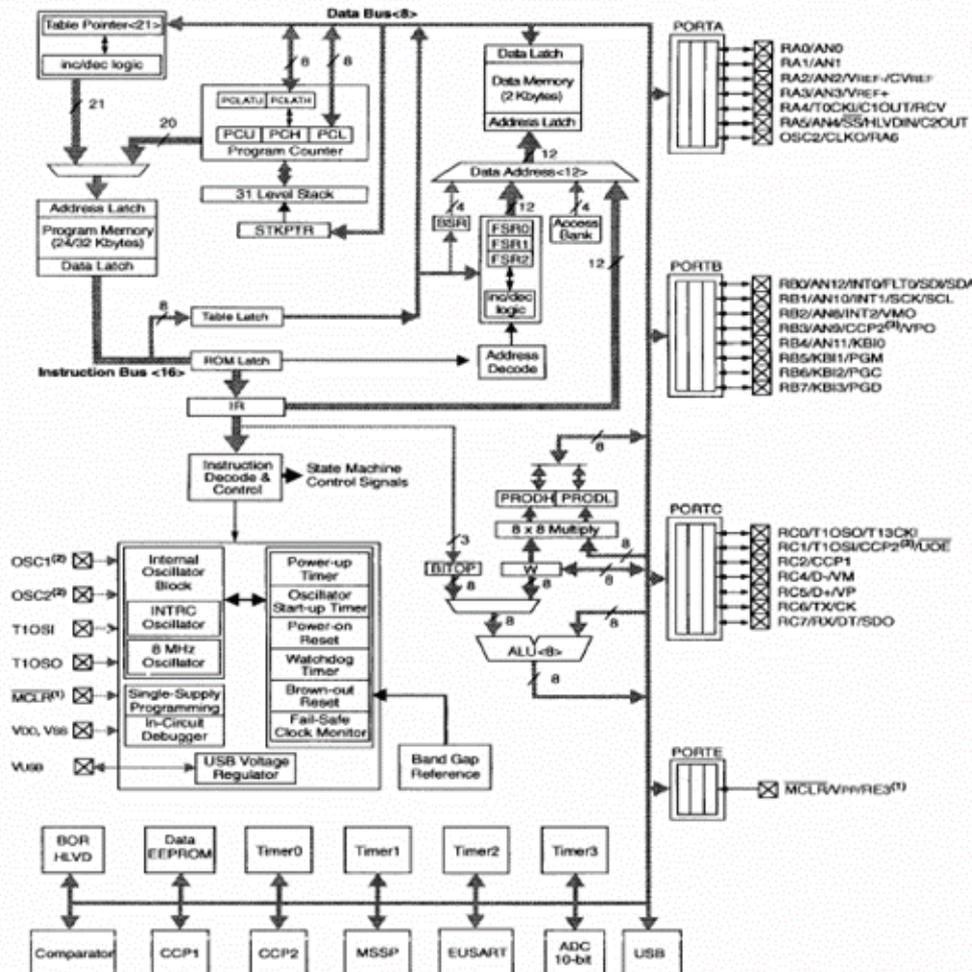
28-Pin PDIP, SOIC



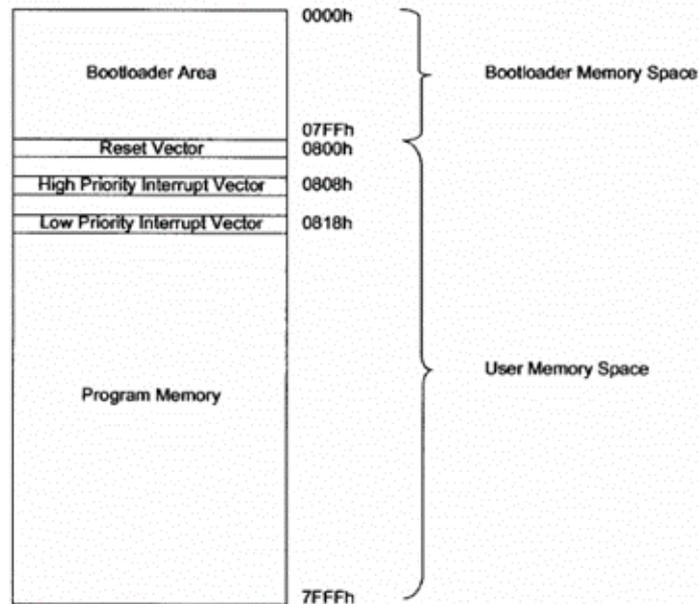
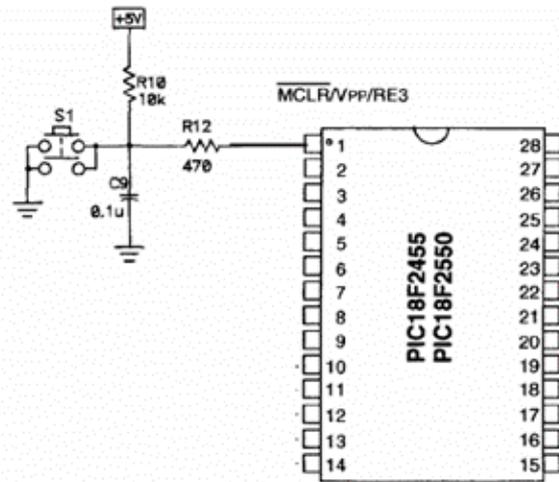
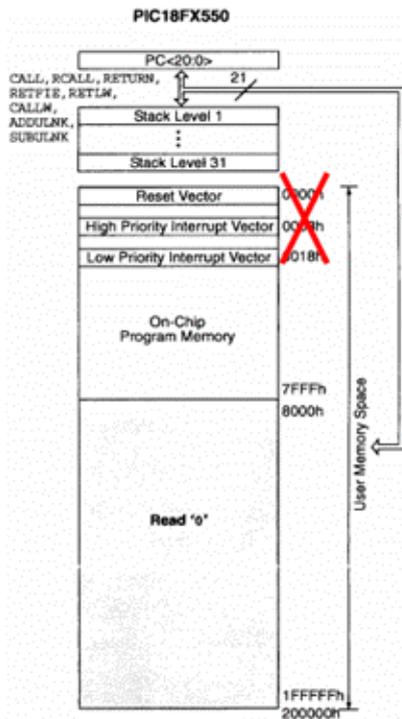
Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EUSART	Comparators	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SP1™	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

BLOCK DIAGRAM

FIGURE 1-1: PIC18F2455/2550 (28-PIN) BLOCK DIAGRAM

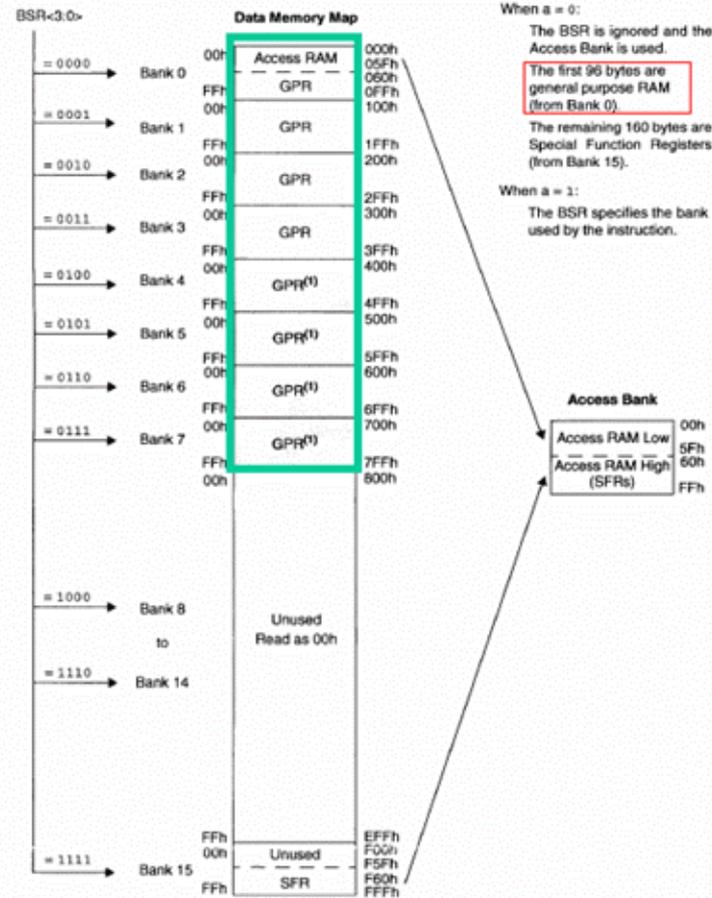


PROGRAM MEMORY MAP



DATA MEMORY MAP

FIGURE 5-5: DATA MEMORY MAP FOR PIC18F2455/2550/4455/4550 DEVICES



SPECIAL FUNCTION REGISTERS

TABLE 5-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER MAP FOR PIC18F2455/2550/4455/4550 DEVICES

Address	Name	Address	Name	Address	Name	Address	Name
FFFh	TOSU	FDfh	INDF2 ⁽¹⁾	FBfh	CCPR1H	F9fh	IPR1
FFEh	TOSH	FDEh	POSTINC2 ⁽¹⁾	FBEh	CCPR1L	F9eh	PIR1
FFDh	TOSL	FD0h	POSTDEC2 ⁽¹⁾	FBDh	CCP1CON	F9Ch	PIE1
FFCh	STKPTR	FDCh	PREINC2 ⁽¹⁾	FBCh	CCPR2H	F9Bh	— ⁽⁰⁾
FFBh	PCLATU	FDBh	PLUSW2 ⁽¹⁾	FBBh	CCPR2L	F9Ah	OSCTUNE
FFAh	PCLATH	FDAh	FSR2H	FBAh	CCP2CON	F9Ah	— ⁽⁰⁾
FF9h	PCL	FD9h	FSR2L	FB9h	— ⁽⁰⁾	F99h	— ⁽⁰⁾
FF8h	TBLPTRU	FD8h	STATUS	FB8h	BAUDCON	F98h	— ⁽⁰⁾
FF7h	TBLPTRH	FD7h	TMR0H	FB7h	ECCP1DEL	F97h	— ⁽⁰⁾
FF6h	TBLPTRL	FD6h	TMR0L	FB6h	ECCP1AS	F96h	TRISE ⁽⁰⁾
FF5h	TABLAT	FD5h	T0CON	FB5h	CVRCON	F95h	TRISD ⁽⁰⁾
FF4h	PRODH	FD4h	— ⁽⁰⁾	FB4h	CMCON	F94h	TRISC
FF3h	PRODL	FD3h	OSCCON	FB3h	TMR3H	F93h	TRISB
FF2h	INTCON	FD2h	HLVDCON	FB2h	TMR3L	F92h	TRISA
FF1h	INTCON2	FD1h	WDTCON	FB1h	T3CON	F91h	— ⁽⁰⁾
FF0h	INTCON3	FD0h	RCON	FB0h	SPBRGH	F90h	— ⁽⁰⁾
FEFh	INDF0 ⁽¹⁾	FCfh	TMR1H	FAfh	SPBRG	F8fh	— ⁽⁰⁾
FEeh	POSTINC0 ⁽¹⁾	FCeh	TMR1L	FAeh	RCREG	F8eh	— ⁽⁰⁾
FECh	POSTDEC0 ⁽¹⁾	FCDh	T1CON	FADh	TXREG	F8Dh	LATE ⁽⁰⁾
FECh	PREINC0 ⁽¹⁾	FCCh	TMR2	FACh	TXSTA	F8Ch	LATD ⁽⁰⁾
FEbh	PLUSW0 ⁽¹⁾	FCBh	PR2	FADh	RCSTA	F8Bh	LATC
FEAh	FSR0H	FCAh	T2CON	FAAh	— ⁽⁰⁾	F8Ah	LATB
FE9h	FSR0L	FC9h	SSPBUF	FA9h	EEADR	F89h	LATA
FE8h	WREG	FC8h	SSPADDD	FA8h	EEDATA	F88h	— ⁽⁰⁾
FE7h	INDF1 ⁽¹⁾	FC7h	SSPSTAT	FA7h	EECON2 ⁽¹⁾	F87h	— ⁽⁰⁾
FE6h	POSTINC1 ⁽¹⁾	FC6h	SSPCON1	FA6h	EECON1	F86h	— ⁽⁰⁾
FE5h	POSTDEC1 ⁽¹⁾	FC5h	SSPCON2	FA5h	— ⁽⁰⁾	F85h	— ⁽⁰⁾
FE4h	PREINC1 ⁽¹⁾	FC4h	ADRESH	FA4h	— ⁽⁰⁾	F84h	PORTE
FE3h	PLUSW1 ⁽¹⁾	FC3h	ADRESL	FA3h	— ⁽⁰⁾	F83h	PORTD ⁽⁰⁾
FE2h	FSR1H	FC2h	ADCON0	FA2h	IPR2	F82h	PORTC
FE1h	FSR1L	FC1h	ADCON1	FA1h	PIR2	F81h	PORTB
FE0h	BSR	FC0h	ADCON2	FA0h	PIE2	F80h	PORTA

Note 1: Not a physical register.

SPECIAL FUNCTION REGISTERS

REGISTER 5-2: STATUS REGISTER

U-0	U-0	U-0	R/W-x	R/W-x	R/W-x	R/W-x	R/W-x	
—	—	—	N	OV	Z	DC	C	
bit 7							bit 0	

bit 7-5	Unimplemented: Read as '0'
bit 4	N: Negative bit This bit is used for signed arithmetic (2's complement). It indicates whether the result was negative (ALU MSB = 1). 1 = Result was negative 0 = Result was positive
bit 3	OV: Overflow bit This bit is used for signed arithmetic (2's complement). It indicates an overflow of the 7-bit magnitude which causes the sign bit (bit 7) to change state. 1 = Overflow occurred for signed arithmetic (in this arithmetic operation) 0 = No overflow occurred
bit 2	Z: Zero bit 1 = The result of an arithmetic or logic operation is zero 0 = The result of an arithmetic or logic operation is not zero
bit 1	DC: Digit Carry/Borrow bit For ADDWF, ADDLW, SUBLW and SUBWF instructions: 1 = A carry-out from the 4th low-order bit of the result occurred 0 = No carry-out from the 4th low-order bit of the result Note: For Borrow, the polarity is reversed. A subtraction is executed by adding the two's complement of the second operand. For rotate (RRF, RLF) instructions, this bit is loaded with either bit 4 or bit 3 of the source register.
bit 0	C: Carry/Borrow bit For ADDWF, ADDLW, SUBLW and SUBWF instructions: 1 = A carry-out from the Most Significant bit of the result occurred 0 = No carry-out from the Most Significant bit of the result occurred Note: For Borrow, the polarity is reversed. A subtraction is executed by adding the two's complement of the second operand. For rotate (RRF, RLF) instructions, this bit is loaded with either the high or low-order bit of the source register.

INSTRUCTION SET

TABLE 26-2: PIC18FXXXX INSTRUCTION SET

Mnemonic, Operands	Description	Cycles	16-Bit Instruction Word		Status Affected	Notes		
			MSb	LSb				
BYTE-ORIENTED OPERATIONS								
ADDWF f, d, a	Add WREG and f	1	0010	01da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	1, 2
ADDWFC f, d, a	Add WREG and Carry bit to f	1	0010	00da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	1, 2
ANDWF f, d, a	AND WREG with f	1	0001	01da	ffff	ffff	Z, N	1, 2
CLRF f, a	Clear f	1	0110	101a	ffff	ffff	Z	2
COMF f, d, a	Complement f	1	0001	11da	ffff	ffff	Z, N	1, 2
CPFSEQ f, a	Compare f with WREG, skip =	1 (2 or 3)	0110	001a	ffff	ffff	None	4
CPFSGT f, a	Compare f with WREG, skip >	1 (2 or 3)	0110	010a	ffff	ffff	None	4
CPFSLT f, a	Compare f with WREG, skip <	1 (2 or 3)	0110	000a	ffff	ffff	None	1, 2
DECf f, d, a	Decrement f	1	0000	01da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	1, 2, 3, 4
DECFSZ f, d, a	Decrement f, Skip if 0	1 (2 or 3)	0010	11da	ffff	ffff	None	1, 2, 3, 4
DCFSNZ f, d, a	Decrement f, Skip if Not 0	1 (2 or 3)	0100	11da	ffff	ffff	None	1, 2
INCF f, d, a	Increment f	1	0010	10da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	1, 2, 3, 4
INCFSZ f, d, a	Increment f, Skip if 0	1 (2 or 3)	0011	11da	ffff	ffff	None	4
INFSNZ f, d, a	Increment f, Skip if Not 0	1 (2 or 3)	0100	10da	ffff	ffff	None	1, 2
IORWF f, d, a	Inclusive OR WREG with f	1	0001	00da	ffff	ffff	Z, N	1, 2
MOVF f, d, a	Move f	1	0101	00da	ffff	ffff	Z, N	1
MOVFF f _s , f _d	Move f _s (source) to f _d (destination)	2	1100	ffff	ffff	ffff	None	
MOVWF f, a	Move WREG to f	1	0110	111a	ffff	ffff	None	
MULWF f, a	Multiply WREG with f	1	0000	001a	ffff	ffff	None	1, 2
NEGf f, a	Negate f	1	0110	110a	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	
RLCF f, d, a	Rotate Left f through Carry	1	0011	01da	ffff	ffff	C, Z, N	1, 2
RLNCF f, d, a	Rotate Left f (No Carry)	1	0100	01da	ffff	ffff	Z, N	
RRCF f, d, a	Rotate Right f through Carry	1	0011	00da	ffff	ffff	C, Z, N	
RRNCF f, d, a	Rotate Right f (No Carry)	1	0100	00da	ffff	ffff	Z, N	
SETF f, a	Set f	1	0110	100a	ffff	ffff	None	1, 2
SUBFWB f, d, a	Subtract f from WREG with borrow	1	0101	01da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	
SUBWF f, d, a	Subtract WREG from f	1	0101	11da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	1, 2
SUBWFB f, d, a	Subtract WREG from f with borrow	1	0101	10da	ffff	ffff	C, DC, Z, OV, N	
SWAPf f, d, a	Swap nibbles in f	1	0011	10da	ffff	ffff	None	4
TSTFSZ f, a	Test f, skip if 0	1 (2 or 3)	0110	011a	ffff	ffff	None	1, 2
XORWF f, d, a	Exclusive OR WREG with f	1	0001	10da	ffff	ffff	Z, N	

TABLE 26-2: PIC18FXXXX INSTRUCTION SET (CONTINUED)

Mnemonic, Operands	Description	Cycles	16-Bit Instruction Word				Status Affected	Notes	
			MSb	LSb					
BIT-ORIENTED OPERATIONS									
BCF	f, b, a	Bit Clear f	1	1001	bbba	ffff	ffff	None	1, 2
BSF	f, b, a	Bit Set f	1	1000	bbba	ffff	ffff	None	1, 2
BTFS	f, b, a	Bit Test f, Skip if Clear	1 (2 or 3)	1011	bbba	ffff	ffff	None	3, 4
BTFS	f, b, a	Bit Test f, Skip if Set	1 (2 or 3)	1010	bbba	ffff	ffff	None	3, 4
BTG	f, d, a	Bit Toggle f	1	0111	bbba	ffff	ffff	None	1, 2
CONTROL OPERATIONS									
BC	n	Branch if Carry	1 (2)	1110	0010	nnnn	nnnn	None	
BN	n	Branch if Negative	1 (2)	1110	0110	nnnn	nnnn	None	
BNC	n	Branch if Not Carry	1 (2)	1110	0011	nnnn	nnnn	None	
BNN	n	Branch if Not Negative	1 (2)	1110	0111	nnnn	nnnn	None	
BNOV	n	Branch if Not Overflow	1 (2)	1110	0101	nnnn	nnnn	None	
BNZ	n	Branch if Not Zero	1 (2)	1110	0001	nnnn	nnnn	None	
BOV	n	Branch if Overflow	1 (2)	1110	0100	nnnn	nnnn	None	
BRA	n	Branch Unconditionally	2	1101	0nnn	nnnn	nnnn	None	
BZ	n	Branch if Zero	1 (2)	1110	0000	nnnn	nnnn	None	
CALL	n, s	Call subroutine 1st word 2nd word	2	1110	110s	kkkk	kkkk	None	
CLRWDT	—	Clear Watchdog Timer	1	0000	0000	0000	0100	TO, PD	
DAW	—	Decimal Adjust WREG	1	0000	0000	0000	0111	C	
GOTO	n	Go to address 1st word 2nd word	2	1110	1111	kkkk	kkkk	None	
NOP	—	No Operation	1	0000	0000	0000	0000	None	4
NOP	—	No Operation	1	1111	xxxx	xxxx	xxxx	None	
POP	—	Pop top of return stack (TOS)	1	0000	0000	0000	0110	None	
PUSH	—	Push top of return stack (TOS)	1	0000	0000	0000	0101	None	
RCALL	n	Relative Call	2	1101	1nnn	nnnn	nnnn	None	
RESET	—	Software device Reset	1	0000	0000	1111	1111	All	
RETFIE	s	Return from interrupt enable	2	0000	0000	0001	000s	GIE/GIEH, PEIE/GIEL	
RETLW	k	Return with literal in WREG	2	0000	1100	kkkk	kkkk	None	
RETURN	s	Return from Subroutine	2	0000	0000	0001	001s	None	
SLEEP	—	Go into Standby mode	1	0000	0000	0000	0011	TO, PD	

TABLE 26-2: PIC18FXXXX INSTRUCTION SET (CONTINUED)

Mnemonic, Operands	Description	Cycles	16-Bit Instruction Word				Status Affected	Notes	
			MSb	LSb					
LITERAL OPERATIONS									
ADDLW	k	Add literal and WREG	1	0000	1111	kkkk	kkkk	C, DC, Z, OV, N	
ANDLW	k	AND literal with WREG	1	0000	1011	kkkk	kkkk	Z, N	
IORLW	k	Inclusive OR literal with WREG	1	0000	1001	kkkk	kkkk	Z, N	
LFSR	f, k	Move literal (12-bit) to FSR(f) 1st word 2nd word	2	1110	1110	00ff	kkkk	None	
MOVLB	k	Move literal to BSR<3:0>	1	0000	0001	0000	kkkk	None	
MOVLW	k	Move literal to WREG	1	0000	1110	kkkk	kkkk	None	
MULLW	k	Multiply literal with WREG	1	0000	1101	kkkk	kkkk	None	
RETLW	k	Return with literal in WREG	2	0000	1100	kkkk	kkkk	None	
SUBLW	k	Subtract WREG from literal	1	0000	1000	kkkk	kkkk	C, DC, Z, OV, N	
XORLW	k	Exclusive OR literal with WREG	1	0000	1010	kkkk	kkkk	Z, N	
DATA MEMORY ↔ PROGRAM MEMORY OPERATIONS									
TBLRD*		Table Read	2	0000	0000	0000	1000	None	
TBLRD*+		Table Read with post-increment		0000	0000	0000	1001	None	
TBLRD*-		Table Read with post-decrement		0000	0000	0000	1010	None	
TBLRD*+		Table Read with pre-increment		0000	0000	0000	1011	None	
TBLWT*		Table Write	2	0000	0000	0000	1100	None	
TBLWT*+		Table Write with post-increment		0000	0000	0000	1101	None	
TBLWT*-		Table Write with post-decrement		0000	0000	0000	1110	None	
TBLWT*+		Table Write with pre-increment		0000	0000	0000	1111	None	

INSTRUCTION SET

ADDLW **ADD Literal to W**

Syntax: ADDLW k

Operands: $0 \leq k \leq 255$

Operation: $(W) + k \rightarrow W$

Status Affected: N, OV, C, DC, Z

Encoding:

0000	1111	kkkk	kkkk
------	------	------	------

Description: The contents of W are added to the 8-bit literal 'k' and the result is placed in W.

Words: 1

Cycles: 1

Q Cycle Activity:

Q1	Q2	Q3	Q4
Decode	Read literal 'k'	Process Data	Write to W

Example: ADDLW 15h

Before Instruction
W = 10h

After Instruction
W = 25h

ADDWF **ADD W to f**

Syntax: ADDWF f [,a]

Operands: $0 \leq f \leq 255$
 $d \in [0,1]$
 $a \in [0,1]$

Operation: $(W) + (f) \rightarrow \text{dest}$

Status Affected: N, OV, C, DC, Z

Encoding:

0010	01da	ffff	ffff
------	------	------	------

Description: Add W to register 'f'. If 'd' is '0', the result is stored in W. If 'd' is '1', the result is stored back in register 'f' (default).
If 'a' is '0', the Access Bank is selected. If 'a' is '1', the BSR is used to select the GPR bank (default).
If 'a' is '0' and the extended instruction set is enabled, this instruction operates in Indexed Literal Offset Addressing mode whenever $f \leq 95$ (5Fh). See Section 26.2.3 "Byte-Oriented and Bit-Oriented Instructions in Indexed Literal Offset Mode" for details.

Words: 1

Cycles: 1

Q Cycle Activity:

Q1	Q2	Q3	Q4
Decode	Read register 'f'	Process Data	Write to destination

Example: ADDWF REG, 0, 0

Before Instruction
W = 17h
REG = 0C2h

After Instruction
W = 0D9h
REG = 0C2h

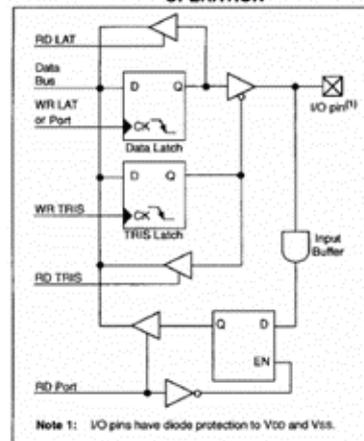
I/O Ports

Each port has three registers for its operation. These registers are:

- TRIS register (data direction register)
- Port register (reads the levels on the pins of the device)
- LAT register (output latch)

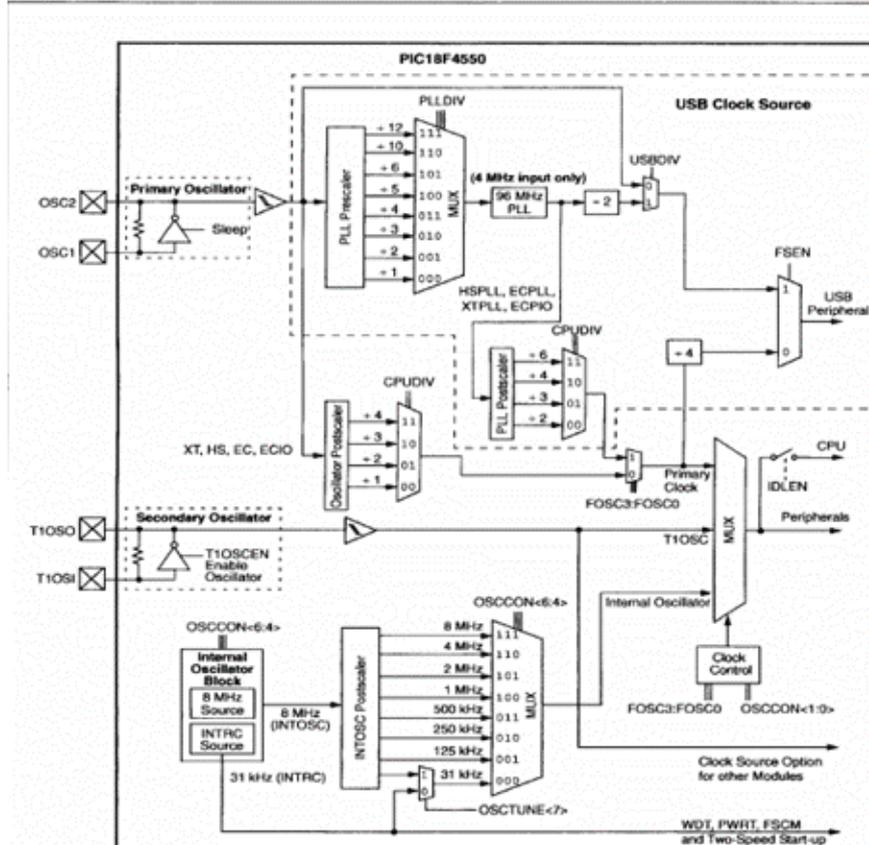
The Data Latch register (LATA) is useful for read-modify-write operations on the value that the I/O pins are driving.

FIGURE 10-1: GENERIC I/O PORT OPERATION



CLOCK

FIGURE 2-1: PIC18F2455/2550/4455/4550 CLOCK DIAGRAM



OSCILLATOR CONTROL

REGISTER 2-2: OSCCON: OSCILLATOR CONTROL REGISTER

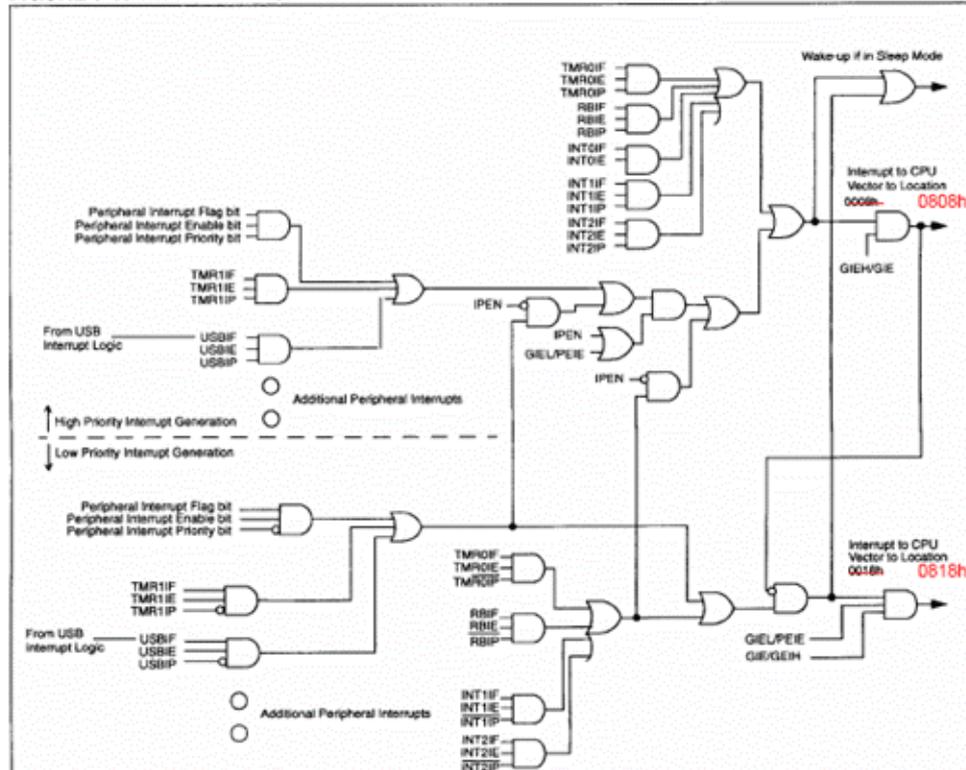
R/W-0	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R ⁽¹⁾	R-0	R/W-0	R/W-0
IDLEN	IRCF2	IRCF1	IRCF0	OSTS	IOFS	SCS1	SCS0
bit 7							bit 0

- bit 7 **IDLEN:** Idle Enable bit
 - 1 = Device enters Idle mode on SLEEP instruction
 - 0 = Device enters Sleep mode on SLEEP instruction
- bit 6-4 **IRCF2:IRCF0:** Internal Oscillator Frequency Select bits
 - 111 = 8 MHz (INTOSC drives clock directly)
 - 110 = 4 MHz
 - 101 = 2 MHz
 - 100 = 1 MHz⁽²⁾
 - 011 = 500 kHz
 - 010 = 250 kHz
 - 001 = 125 kHz
 - 000 = 31 kHz (from either INTOSC/256 or INTRC directly)⁽²⁾
- bit 3 **OSTS:** Oscillator Start-up Time-out Status bit⁽¹⁾
 - 1 = Oscillator Start-up Timer time-out has expired; primary oscillator is running
 - 0 = Oscillator Start-up Timer time-out is running; primary oscillator is not ready
- bit 2 **IOFS:** INTOSC Frequency Stable bit
 - 1 = INTOSC frequency is stable
 - 0 = INTOSC frequency is not stable
- bit 1-0 **SCS1:SCS0:** System Clock Select bits
 - 1x = Internal oscillator block
 - 01 = Timer1 oscillator
 - 00 = Primary oscillator

Note 1: Depends on the state of the IESO configuration bit.
Note 2: Source selected by the INTSRC bit (OSCTUNE<7>), see text.
Note 3: Default output frequency of INTOSC on Reset.

INTERRUPTS

FIGURE 9-1: INTERRUPT LOGIC



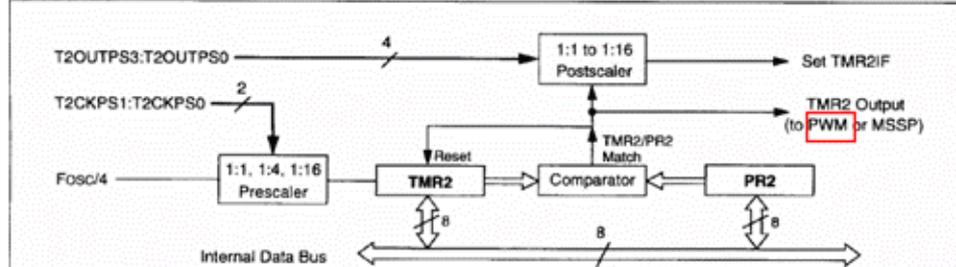
REGISTER 9-1: INTCON: INTERRUPT CONTROL REGISTER

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-x
GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBIF
bit 7							bit 0

- bit 7 **GIE/GIEH: Global Interrupt Enable bit**
 When IPEN = 0:
 1 = Enables all unmasked interrupts
 0 = Disables all interrupts
 When IPEN = 1:
 1 = Enables all high priority interrupts
 0 = Disables all high priority interrupts
- bit 6 **PEIE/GIEL: Peripheral Interrupt Enable bit**
 When IPEN = 0:
 1 = Enables all unmasked peripheral interrupts
 0 = Disables all peripheral interrupts
 When IPEN = 1:
 1 = Enables all low priority peripheral interrupts
 0 = Disables all low priority peripheral interrupts
- bit 5 **TMR0IE: TMR0 Overflow Interrupt Enable bit**
 1 = Enables the TMR0 overflow interrupt
 0 = Disables the TMR0 overflow interrupt
- bit 4 **INT0IE: INT0 External Interrupt Enable bit**
 1 = Enables the INT0 external interrupt
 0 = Disables the INT0 external interrupt
- bit 3 **RBIE: RB Port Change Interrupt Enable bit**
 1 = Enables the RB port change interrupt
 0 = Disables the RB port change interrupt
- bit 2 **TMR0IF: TMR0 Overflow Interrupt Flag bit**
 1 = TMR0 register has overflowed (must be cleared in software)
 0 = TMR0 register did not overflow
- bit 1 **INT0IF: INT0 External Interrupt Flag bit**
 1 = The INT0 external interrupt occurred (must be cleared in software)
 0 = The INT0 external interrupt did not occur
- bit 0 **RBIF: RB Port Change Interrupt Flag bit**
 1 = At least one of the RB7:RB4 pins changed state (must be cleared in software)
 0 = None of the RB7:RB4 pins have changed state

Timer2

FIGURE 13-1: TIMER2 BLOCK DIAGRAM



REGISTER 13-1: T2CON: TIMER2 CONTROL REGISTER

U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	T2OUTPS3	T2OUTPS2	T2OUTPS1	T2OUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0
bit 7							bit 0

- bit 7 **Unimplemented:** Read as '0'
- bit 6-3 **T2OUTPS3:T2OUTPS0:** Timer2 Output Postscale Select bits
 - 0000 = 1:1 Postscale
 - 0001 = 1:2 Postscale
 -
 -
 -
 - 1111 = 1:16 Postscale
- bit 2 **TMR2ON:** Timer2 On bit
 - 1 = Timer2 is on
 - 0 = Timer2 is off
- bit 1-0 **T2CKPS1:T2CKPS0:** Timer2 Clock Prescale Select bits
 - 00 = Prescaler is 1
 - 01 = Prescaler is 4
 - 1x = Prescaler is 16

REGISTER 15-1: CCPxCON: STANDARD CCP CONTROL REGISTER

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—(1)	—(1)	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
bit 7							bit 0

- bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'
- Note 1:** These bits are not implemented on 28-pin devices and are read as '0'.
- bit 5-4 **DCxB1:DCxB0:** PWM Duty Cycle bit 1 and bit 0 for CCP Module x
 - Capture mode:** Unused.
 - Compare mode:** Unused.
 - PWM mode:** These bits are the two LSBs (bit 1 and bit 0) of the 10-bit PWM duty cycle. The eight MSBs (DCx9:DCx2) of the duty cycle are found in CCPxL.
- bit 3-0 **CCPxM3:CCPxM0:** CCP Module x Mode Select bits
 - 0000 = Capture/Compare/PWM disabled (resets CCP module)
 - 0001 = Reserved
 - 0010 = Compare mode, toggle output on match (CCPIF bit is set)
 - 0011 = Reserved
 - 0100 = Capture mode, every falling edge
 - 0101 = Capture mode, every rising edge
 - 0110 = Capture mode, every 4th rising edge
 - 0111 = Capture mode, every 16th rising edge
 - 1000 = Compare mode: initialize CCP pin low; on compare match, force CCP pin high (CCPIF bit is set)
 - 1001 = Compare mode: initialize CCP pin high; on compare match, force CCP pin low (CCPIF bit is set)
 - 1010 = Compare mode: generate software interrupt on compare match (CCPIF bit is set, CCP pin reflects I/O state)
 - 1011 = Compare mode: trigger special event, reset timer, start A/D conversion on CCP2 match (CCPIF bit is set)
 - 11xx = PWM mode

PWM module

FIGURE 15-3: SIMPLIFIED PWM BLOCK DIAGRAM

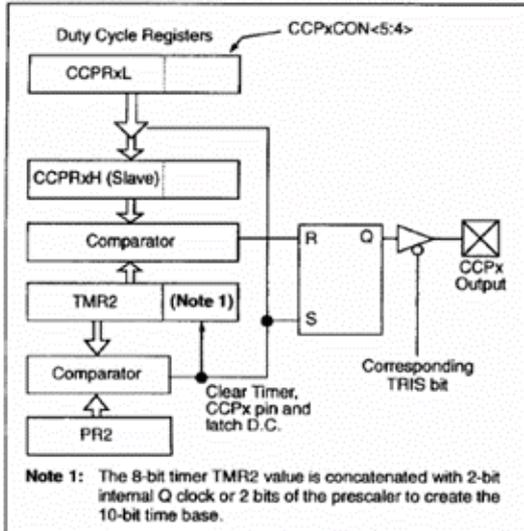
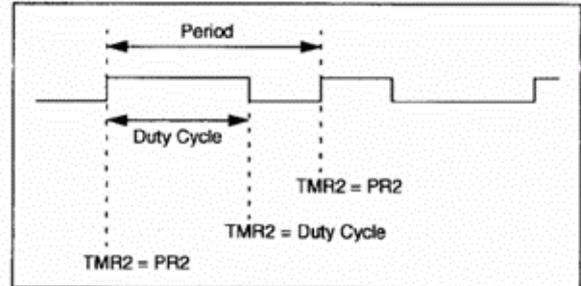


FIGURE 15-4: PWM OUTPUT



15.4.1 PWM PERIOD

The PWM period is specified by writing to the PR2 register. The PWM period can be calculated using the following formula:

EQUATION 15-1:

$$\text{PWM Period} = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot T_{osc} \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

PWM frequency is defined as $1/[\text{PWM period}]$.

When TMR2 is equal to PR2, the following three events occur on the next increment cycle:

- TMR2 is cleared
- The CCPx pin is set (exception: if PWM duty cycle = 0%, the CCPx pin will not be set)
- The PWM duty cycle is latched from CCPRxL into CCPRxH

15.4.2 PWM DUTY CYCLE

The PWM duty cycle is specified by writing to the CCPRxL register and to the CCPxCON<5:4> bits. Up to 10-bit resolution is available. The CCPRxL contains the eight MSBs and the CCPxCON<5:4> contains the two LSBs. This 10-bit value is represented by CCPRxL:CCPxCON<5:4>. The following equation is used to calculate the PWM duty cycle in time:

EQUATION 15-2:

$$\text{PWM Duty Cycle} = (\text{CCPRxL:CCPxCON<5:4>}) \cdot T_{osc} \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

CCPRxL and CCPxCON<5:4> can be written to at any time, but the duty cycle value is not latched into CCPRxH until after a match between PR2 and TMR2 occurs (i.e., the period is complete). In PWM mode, CCPRxH is a read-only register.

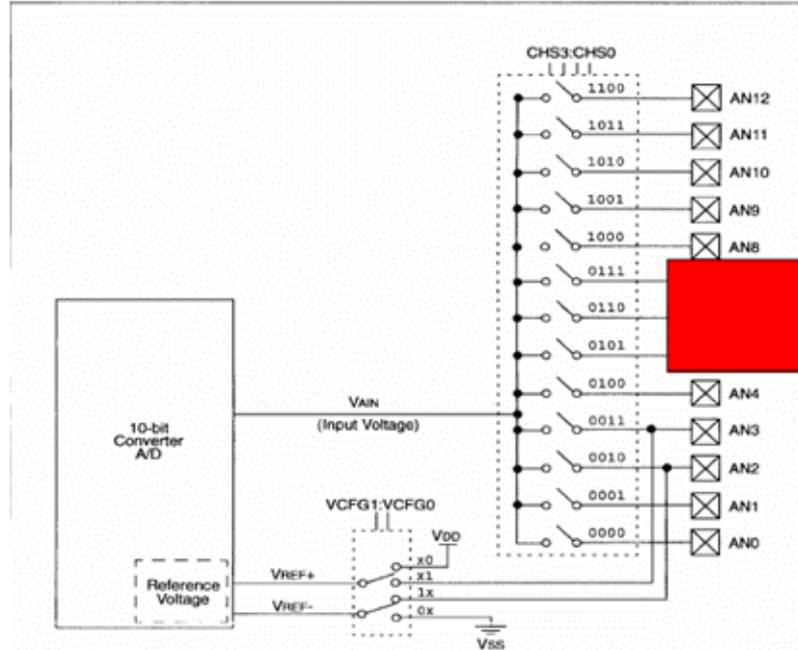
15.4.4 SETUP FOR PWM OPERATION

The following steps should be taken when configuring the CCP module for PWM operation:

1. Set the PWM period by writing to the PR2 register.
2. Set the PWM duty cycle by writing to the CCPRxL register and CCPxCON<5:4> bits.
3. Make the CCPx pin an output by clearing the appropriate TRIS bit.
4. Set the TMR2 prescale value, then enable Timer2 by writing to T2CON.
5. Configure the CCPx module for PWM operation.

ADC module

FIGURE 21-1: A/D BLOCK DIAGRAM

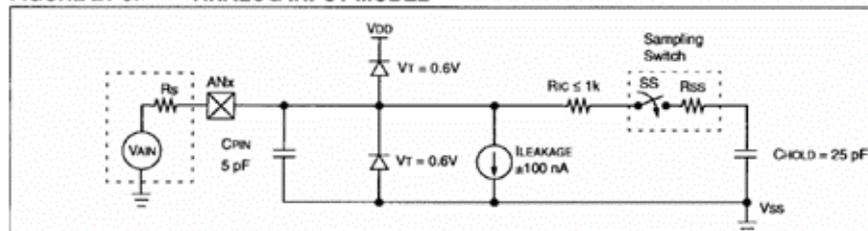


- Note 1:** Channels AN5 through AN7 are not available on 28-pin devices.
Note 2: I/O pins have diode protection to VDD and VSS.

The module has five registers:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)
- A/D Control Register 2 (ADCON2)

FIGURE 21-3: ANALOG INPUT MODEL



The following steps should be followed to perform an A/D conversion:

1. Configure the A/D module:
 - Configure analog pins, voltage reference and digital I/O (ADCON1)
 - Select A/D input channel (ADCON0)
 - Select A/D acquisition time (ADCON2)
 - Select A/D conversion clock (ADCON2)
 - Turn on A/D module (ADCON0)
4. Start conversion:
 - Set GO/DONE bit (ADCON0 register)
5. Wait for A/D conversion to complete, by either:
 - Polling for the GO/DONE bit to be cleared OR
 - Waiting for the A/D interrupt
6. Read A/D Result registers (ADRESH:ADRESL); clear bit ADIF, if required.
7. For next conversion, go to step 1 or step 2, as required. The A/D conversion time per bit is defined as TAD. A minimum wait of 3 TAD is required before the next acquisition starts.

REGISTER 21-1: ADCON0: A/D CONTROL REGISTER 0

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
bit 7						bit 0	

bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5-2 **CHS3:CHS0:** Analog Channel Select bits

- 0000 = Channel 0 (AN0)
- 0001 = Channel 1 (AN1)
- 0010 = Channel 2 (AN2)
- 0011 = Channel 3 (AN3)
- 0100 = Channel 4 (AN4)
- 0101 = Channel 5 (AN5)^(1,2)
- 0110 = Channel 6 (AN6)^(1,2)
- 0111 = Channel 7 (AN7)^(1,2)
- 1000 = Channel 8 (AN8)
- 1001 = Channel 9 (AN9)
- 1010 = Channel 10 (AN10)
- 1011 = Channel 11 (AN11)
- 1100 = Channel 12 (AN12)
- 1101 = Unimplemented⁽²⁾
- 1110 = Unimplemented⁽²⁾
- 1111 = Unimplemented⁽²⁾

Note 1: These channels are not implemented on 28-pin devices.

2: Performing a conversion on unimplemented channels will return a floating input measurement.

bit 1 **GO/DONE:** A/D Conversion Status bit

- When ADON = 1:
- 1 = A/D conversion in progress
- 0 = A/D Idle

bit 0 **ADON:** A/D On bit

- 1 = A/D converter module is enabled
- 0 = A/D converter module is disabled

REGISTER 21-2: ADCON1: A/D CONTROL REGISTER 1

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0 ⁽¹⁾	R/W ⁽¹⁾	R/W ⁽¹⁾	R/W ⁽¹⁾
—	—	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7						bit 0	

bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5 **VCFG1:** Voltage Reference Configuration bit (VREF- source)

- 1 = VREF- (AN2)
- 0 = VSS

bit 4 **VCFG0:** Voltage Reference Configuration bit (VREF+ source)

- 1 = VREF+ (AN3)
- 0 = VDD

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0:** A/D Port Configuration Control bits:

PCFG3: PCFG0	AN12	AN11	AN10	AN9	AN8	AN7 ⁽²⁾	AN6 ⁽²⁾	AN5 ⁽²⁾	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0
0000 ⁽¹⁾	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0001	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0010	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0011	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0100	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0101	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0110	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0111 ⁽¹⁾	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
1000	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A
1001	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A
1010	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
1011	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A
1100	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A
1101	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
1110	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A
1111	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

A = Analog input

D = Digital I/O

REGISTER 21-3: ADCON2: A/D CONTROL REGISTER 2

R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	—	ACQT2	ACQT1	ACQT0	ADCS2	ADCS1	ADCS0
bit 7						bit 0	

bit 7 **ADFM:** A/D Result Format Select bit

- 1 = Right justified
- 0 = Left justified

bit 6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5-3 **ACQT2:ACQT0:** A/D Acquisition Time Select bits

- 111 = 20 TAD
- 110 = 16 TAD
- 101 = 12 TAD
- 100 = 8 TAD
- 011 = 6 TAD
- 010 = 4 TAD
- 001 = 2 TAD
- 000 = 0 TAD⁽¹⁾

bit 2-0 **ADCS2:ADCS0:** A/D Conversion Clock Select bits

- 111 = FRC (clock derived from A/D RC oscillator)⁽¹⁾
- 110 = Fosc/64
- 101 = Fosc/16
- 100 = Fosc/4
- 011 = FRC (clock derived from A/D RC oscillator)⁽¹⁾
- 010 = Fosc/32
- 000 = Fosc/8
- 000 = Fosc/2

MINI-CYLINDER SERIES "ISO 6432" Ø 8-25 mm AND ACCESSORIES

Mini-cylinders to ISO 6432 with a chamfered stainless steel barrel.

The cylinder head dimensions have been reduced for some sizes so that they can be used where there are space restrictions.

Can be used with different types of sensors.

Available in various versions with a wide range of accessories:

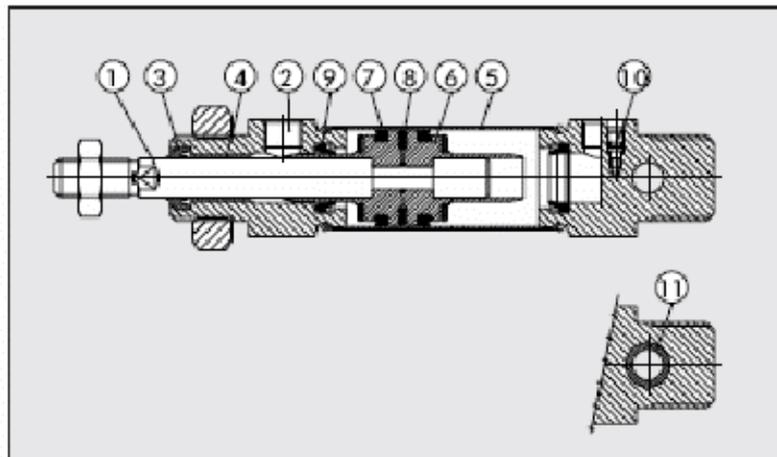
- with or without magnet
- single and double acting – single or through rod
- with pneumatic cushioning (ø16-20-25)
- gaskets made of NBR, POLYURETHANE, and FKM/FPM (for high temperatures), and low-temperature gaskets
- special executions on request
- fixing accessories, guide units and mechanical rod locking



TECHNICAL DATA	Polyurethane	NBR	FKM/FPM	Low temperature
Operating pressure	max 10 bar (max 1 MPa)			
Temperature range	-10°C/+80°C	-10°C/+80°C	-10°C/+130°C (non-magnetic cylinder)	-35°C to +80°C
Fluid	Unlubricated air. Lubrication, if used, must be continuous			
Bore	Ø8, Ø10, Ø12, Ø16, Ø20, Ø25;			
Design	Chamfered barrel			
Standard strokes *	Single-acting: Double-acting:	for bores Ø8-25 strokes from 0 to 50 mm for bores Ø8-10 strokes from 0 to 100 mm for bores Ø12-16 strokes from 0 to 200 mm for bores Ø20-25 strokes from 0 to 500 mm		
	Double-acting, cushioned:	for bores Ø16 strokes from 0 to 300 mm for bores Ø20-25 strokes from 0 to 500		
Versions	Double-acting, Double-acting cushioned, Single-acting retractable piston rod, Through-rod, Through-rod cushioned, Version with piston rod block, no-stick slip*			
Magnet for sensors	All versions come complete with magnet. Supplied without magnet on request.			
Inrush pressure	Ø8 to Ø12: 0.8 bar - Ø16 to Ø25: 0.6 bar			
Forms generated at 6 bar thrust/retraction	See GENERAL CATALOGUE PAGE 1.1,05			
Weights	See GENERAL CATALOGUE PAGE 1.1,06			
	* Maximum recommended strokes. Higher values can create operating problems. *For no-stick slip versions, are no-lubricated air only			

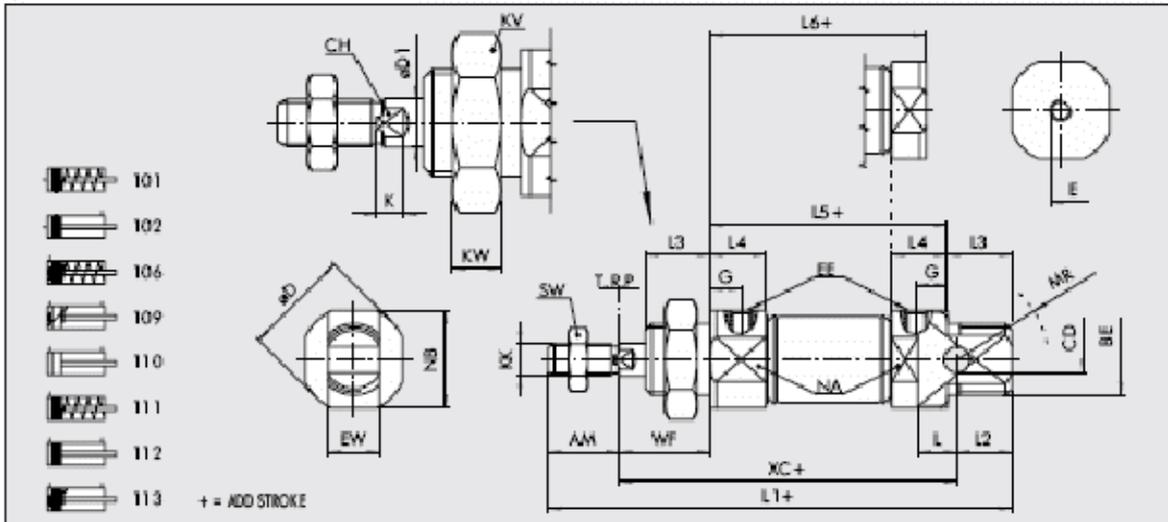
COMPONENTS

- ① PISTON ROD: C45 steel or stainless steel, thick chromed
- ② HEAD: anodised aluminium alloy
- ③ PISTON ROD GASKET: SFR (PARKER PRADIFA) self-lubricating, NBR or FKM/FPM
- ④ GUIDE BUSHING: steel strip with bronze and PTFE insert
- ⑤ BARREL: AISI 304 steel
- ⑥ HALF-PISTON: acetal resin
- ⑦ PISTON ROD GASKET: polyurethane (PARKER PRADIFA), NBR or FKM/FPM
- ⑧ MAGNET: plasto-neodymium
- ⑨ CUSHIONING GASKET: NBR or FKM/FPM
- ⑩ NEEDLE: OT 58 with needle out movement safety system even when fully open
- ⑪ BUSHING (optional): self-lubricating bronze



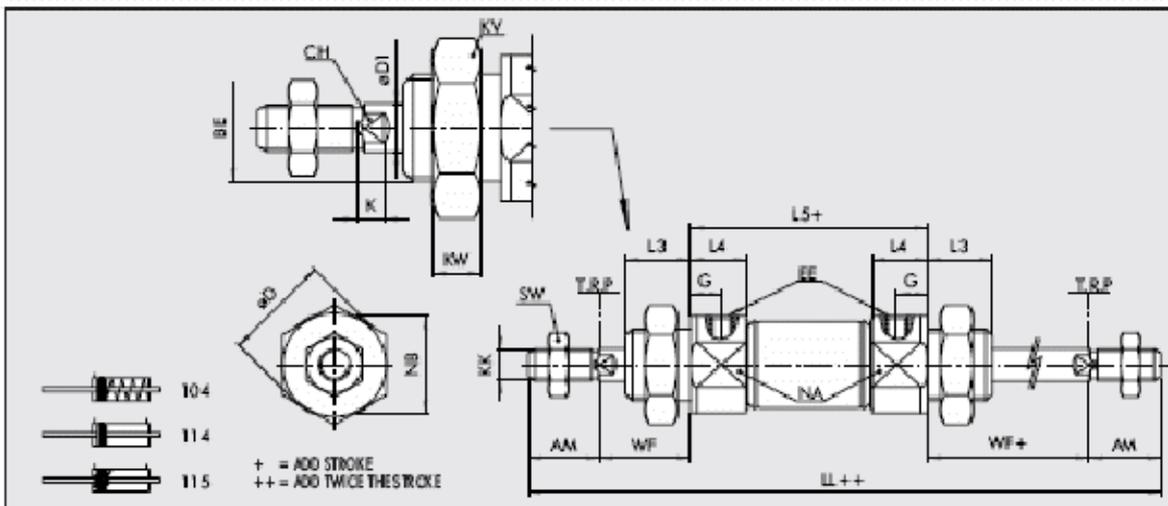


DIMENSIONS OF STANDARD VERSIONS



Ø	AM (+0.0/-2.0)	BE	eCD (H)	eD	eD1	E	G	EE	EW H10	L	L1	L2	L3	L4	L5	L6	RK	XC(±1)	WF(±1,2)	KV	KV'	NA	NB	SW	CH	K	
8	12	M12x1,25	4	16.7	4	M5	6	M5	8	6.5	8.6	1.0	12	10	46	46	M4	64	16	7	19	12	15	15	7	3	3
10	12	M12x1,25	4	16.7	4	M5	6	M5	8	6.5	8.6	1.0	12	10	46	46	M4	64	16	7	19	12	15	15	7	3	3
12	16	M16x1,5	6	19	6	M5	6	M5	12	9	10.4	1.3	17	10	49	47	M6	75	22	8	24	16	17	17	10	5	3,5
16	16	M16x1,5	6	19.7	6	1/8	6	M5	12	9	11.1	1.3	17	10	56	53	M6	82	22	8	24	16	20	18	10	5	3,5
20	20	M20x1,5	8	27.9	8	1/8	8	G 1/8	16	12	12.9	1.4	17	15.5	68	61	M8	95	24	10	32	18	28	24	13	7	4,6
25	22	M22x1,5	8	33	10	1/8	9	G 1/8	16	12	14.3	1.7	20	17.1	73	66.5	M10x1,25	104	28	10	32	21	30	30	17	8	5

DIMENSIONS OF STANDARD VERSIONS WITH THROUGH-ROD



Ø	AM (+0.0/-2.0)	BE	eD	eD1	G	EE	LL	L3	L4	L5	RK	WF(±1,2)	KV	KV'	NA	NB	SW	CH	K
8	12	M12x1,25	16.7	4	6	M5	1.02	12	1.0	46	M4	16	7	19	15	15	7	3	3
10	12	M12x1,25	16.7	4	6	M5	1.02	12	1.0	46	M4	16	7	19	15	15	7	3	3
12	16	M16x1,5	19	6	6	M5	1.25	17	1.0	49	M6	22	8	24	17	17	10	5	3,5
16	16	M16x1,5	19.7	6	6	M5	1.32	17	1.0	56	M6	22	8	24	20	18	10	5	3,5
20	20	M20x1,5	27.9	8	8	G 1/8	1.56	17	1.5.5	68	M8	24	10	32	28	24	13	7	4,6
25	22	M22x1,5	33	10	9	G 1/8	1.73	20	1.7.1	73	M10x1,25	28	10	32	30	30	17	8	5

KEY TO CODES

CYL	1	1	2	0	1	6	0	0	2	0	C	P
	TYPE			DIAMETER			STROKE					
	101	SE axial coupling		0	Standard	▼ 08	For the maximum applicable strokes, look at the technical data	A	C45 chrome rod, aluminium piston rod	P polyurethane		
	102	DEM axial coupling		U	Bronze rear head bushing	▼ 10		C	C45 chrome rod, technopolymer piston rod	N NBR		
	104	SE through-rod		V	Without head nut	▼ 12				● V FKM/FFKM		
■	106	SE cushioned		S	Non-magnetic	20				● B low temperature		
■	109	DEA				25		Z	Stainless steel piston rod and nut			
	110	DE		▲ G	No stick slip			X	Stainless steel piston rod and nut			
	111	SE										
	112	DEM										
■	113	DEMA										
*▼	114	DEM through-rod										
*▼■	115	DEMA through-rod										
◆	116	DEM for mechanical lock										
■	117	DEMA for mechanical lock										

DE: Double-acting (non-cushioned, not magnetic)
DEM: Magnetic double-acting (non-cushioned)
DEMA: Magnetic double-acting (cushioned)
DEA: Cushioned double-acting (non-magnetic)
SE: Single-acting (magnetic)

● Only available for non-magnetic versions (S) and with aluminium piston (A or Z)
 ▲ Not available for NBR (N) versions
 ▼ Stainless steel piston rod
 ■ Available from Ø16
 ◆ Available from Ø12
 * For Ø16+25 aluminium piston, stainless steel piston rod



ZAWORY MACH 11

Zawory serii Mach 11 z przyłączami M7 dostępne są w następujących wersjach:

- 5/2 monostabilne i bistabilne
- 5/3 z odciętymi, napowietrzonymi lub odpowietrzonymi wyjściami w położeniu spoczynkowym

Sterowanie:

- pneumatyczne
- elektryczne 24V

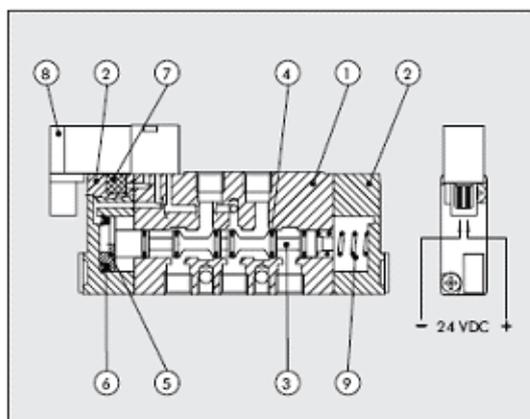
Wyjątkowo zwarta konstrukcja (tylko 11 mm szerokości) o doskonałych parametrach sprawia, że zawory mogą być użyte do licznych zastosowań w automatyce przemysłowej.

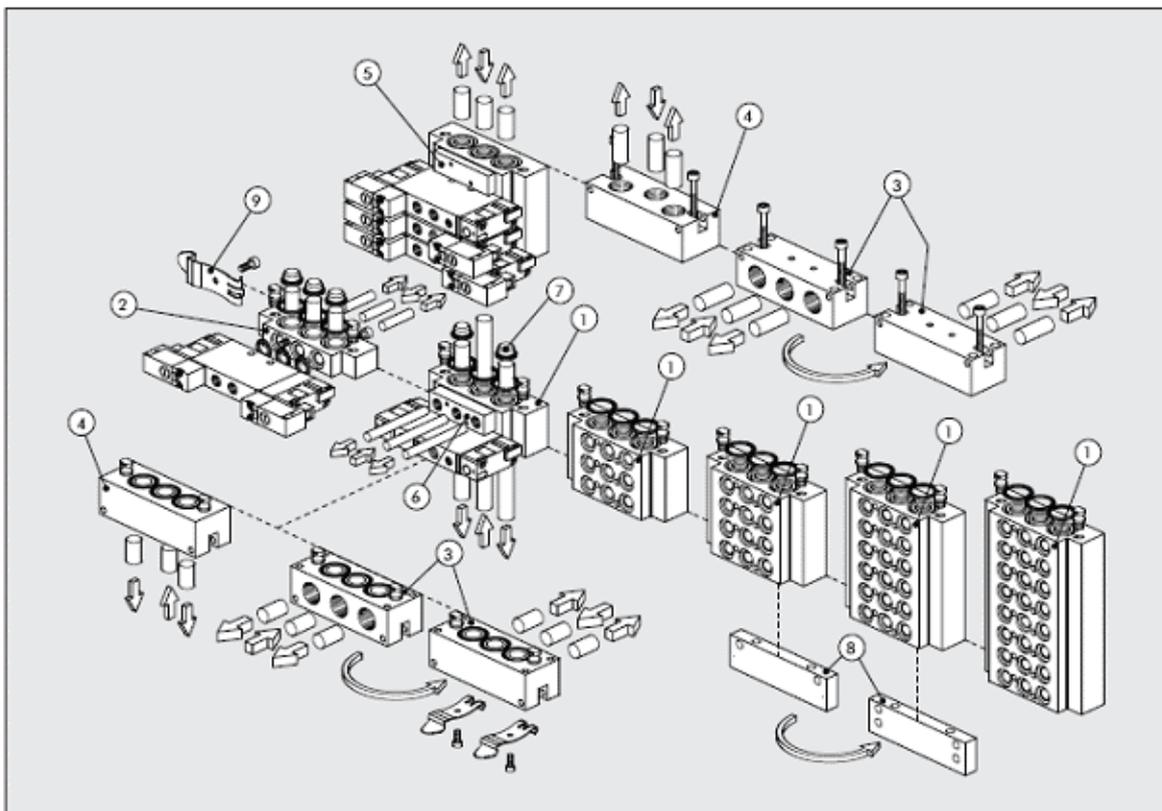
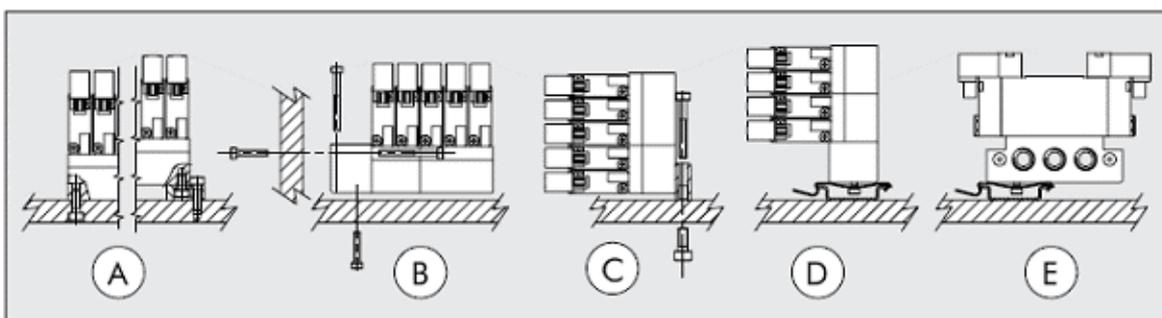


DANE TECHNICZNE		M7 M5		
Przyłącza		M7: Ø 11 mm M5: Ø 9 mm		
Przyłącza pilotów		-10 °C + +60 °C		
Max. zewnętrzna średnica uszczelnień	mm	Filtrowane sprężone powietrze nie olejone. W przypadku smarowania konieczność kontynuacji.		
Zakres temperatur pracy	°C	M3		
Medium robocze		400 Nl/min		
Śruby do montażu		M3		
Przepływ nominalny (przy 6 bar ΔP 1 bar)	Nl/min	400 Nl/min		
Ciężenie robocze	bar	Elekrozawór - monostabilny: 2÷7 bar - bistabilny: 1÷7 bar - 5/3: 2/7 bar	Elekrozawór z zewnętrznym zasilaniem pilotów - ciśnienie pilota: 2÷7 bar - zawór próżnia + 10 bar	Pneumatyczny - monostabilny ciśnienie sterujące: 2÷10 bar - bistabilny ciśnienie sterujące: 1÷10 bar - ciśnienie sterujące 5/3: 2÷10 bar - zawór próżnia + 10 bar
Napięcie		24 VDC ± 10%		
Pobór mocy		1,2 W		
Klasa izolacji		F155		
Stopień ochrony		IP 51*		
Czas pracy ciągłej		100% ED		
TRA/TRR monostabilne przy 6 bar	ms	10 ms / 45 ms		4 ms / 9 ms
TRA/TRR bistabilne przy 6 bar	ms	22 ms / 22 ms		4 ms / 4 ms
TRA/TRR 5/3 monostabilne przy 6 bar	ms	22 ms / 22 ms		4 ms / 4 ms
		*IP 65 na życzenie		

BUDOWA

- ① KORPUS ZAWORU: aluminium
- ② POKRYWA STERUJĄCA/KOŃCOWA: HOSTAFORM®
- ③ SUWAK: aluminium
- ④ USZCZELNIENIA: poliuretan
- ⑤ TŁOK: HOSTAFORM®
- ⑥ USZCZELNIENIE TŁOKA: poliuretan
- ⑦ TRUMIK: brąz spiekany
- ⑧ PILOT: z wbudowaną cewką
- ⑨ SPRĘŻYNA: stal specjalna
- ⑩ ZDEJMOWALNA TABLICZKA OPISOWA



MODUŁOWOŚĆ MACH 11

SPOSOBY MONTAŻU PŁYTY PRZYŁĄCZENIOWEJ

KLUCZ DO INDEKSÓW

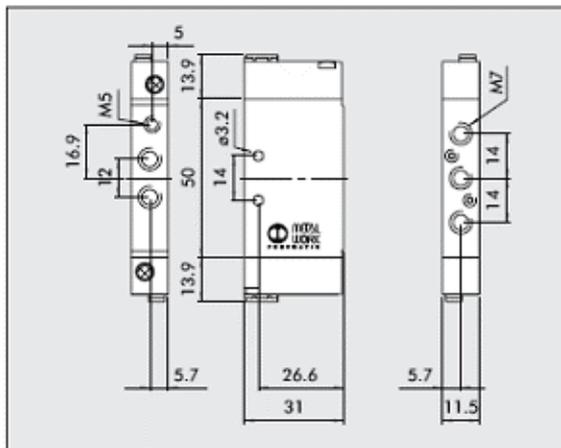
M	S	V	1	5	S	O	B	0	0	24VDC	
RODZINA		PORT		FUNKCJA		STEROWANIE 14		POWRÓT		DALSZY OPIS	
MSV	Mini	1	M7	5	5/2	SO	Elektrozawór	B	bistabilny	00	5/2 standard
	elektrozawory			6	5/3	SE	elektrozawór z	S	sprężyna	CC	wyjścia odcięte
MPV	Mini						zasilaniem pilotów		mechaniczna	OC	wyjścia
	zawory					PN	pneumatyczny				odpowietrzone
	pneumatyczne									PC	wyjścia
											napowietrzone

W przypadku zapotrzebowania zaworów Mach ze stopniem ochrony IP 65 prosimy o kontakt z Działem Handlowym.



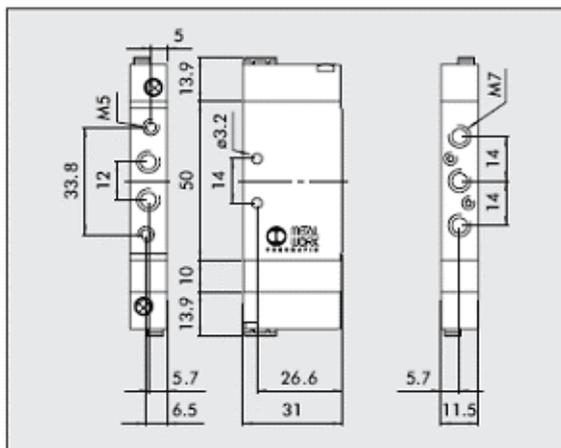
ZAWORY MACH 11, STEROWANE PNEUMATYCZNIE

MONOSTABILNE 5/2



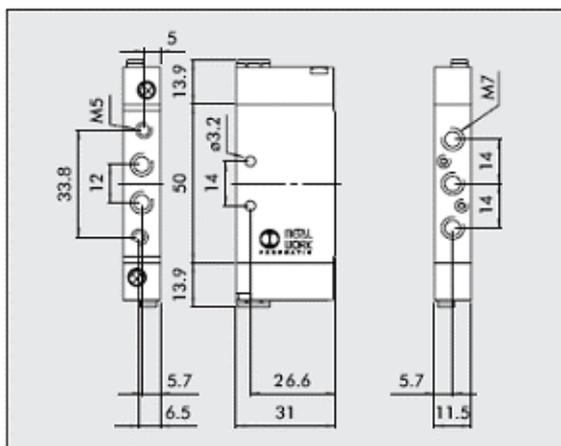
Symbol	Typ	Indeks	Masa [g]
→ +	MPV 15 PNS OO	7061010130	52

MONOSTABILNE 5/3



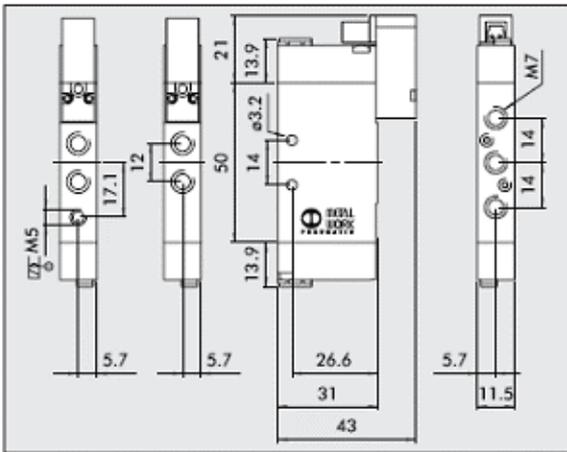
Symbol	Typ	Indeks	Masa [g]
→ +	MPV 16 PNS CC	7061010210	62
→ +	MPV 16 PNS OC	7061010310	62
→ +	MPV 16 PNS PC	7061010410	62

BISTABILNE 5/2



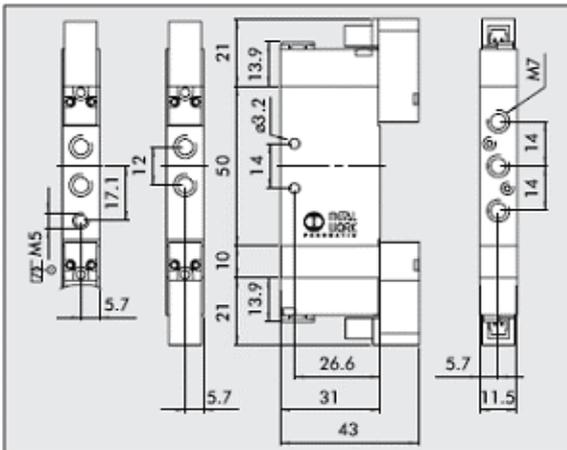
Symbol	Typ	Indeks	Masa [g]
→ +	MPV 15 PNB OO	7061010110	52

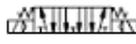
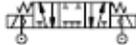
MONOSTABILNE 5/2



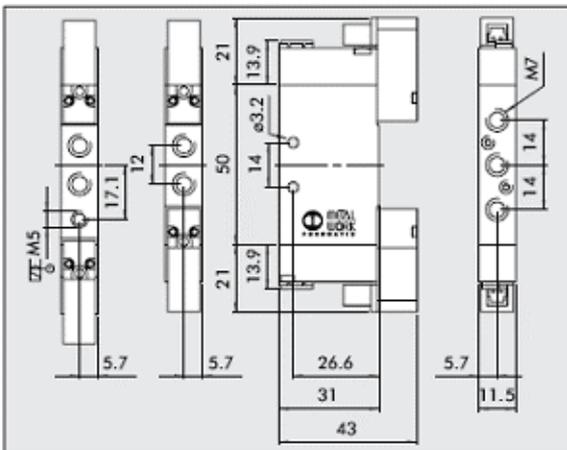
Symbol	Typ	Indeks	Masa [g]
	MSV 15 SOS OO 24VDC	7061020132	60
	MSV 15 SES OO 24VDC	7061030132	60

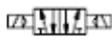
MONOSTABILNE 5/3



Symbol	Typ	Indeks	Masa [g]
	MSV 16 SOS CC 24VDC	7061020212	82
	MSV 16 SOS OC 24VDC	7061020312	82
	MSV 16 SOS PC 24VDC	7061020412	82
	MSV 16 SES CC 24VDC	7061030212	82
	MSV 16 SES OC 24VDC	7061030312	82
	MSV 16 SES PC 24VDC	7061030412	82

BISTABILNE 5/2

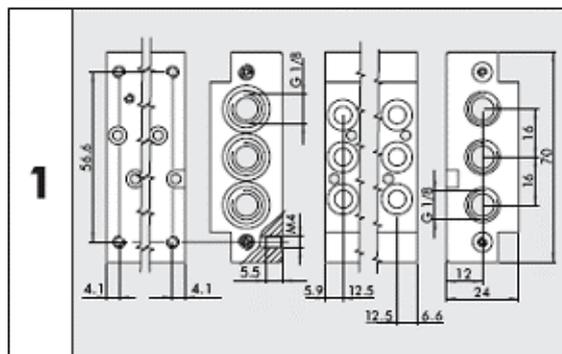


Symbol	Typ	Indeks	Masa [g]
	MSV 15 SOB OO 24 VDC	7061020112	72
	MSV 15 SEB OO 24 VDC	7061030112	88

AKCESORIA: PŁYTY PRZYŁĄCZENIOWE DLA ZAWORÓW MACH 11

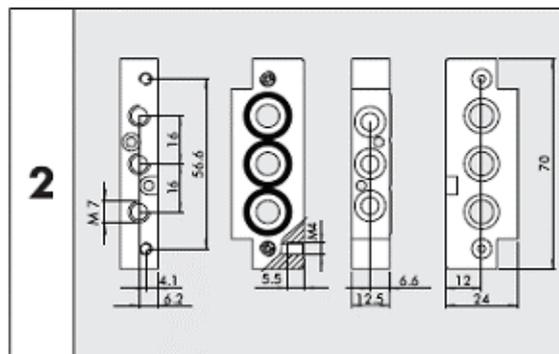


WIELOPOZYCYJNE PŁYTY PRZYŁĄCZENIOWE



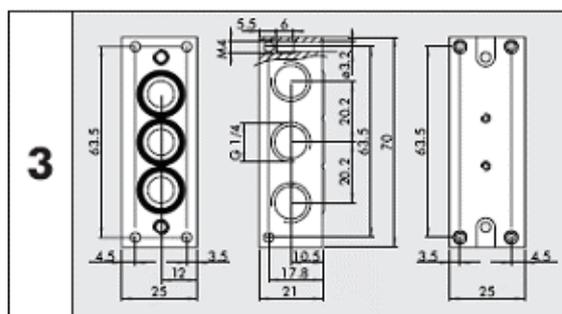
Indeks	Opis	Masa [g]
0227400201	PŁYTA, 2 POZ. DLA MACH 11	94
0227400301	PŁYTA, 3 POZ. DLA MACH 11	140
0227400401	PŁYTA, 4 POZ. DLA MACH 11	186
0227400601	PŁYTA, 6 POZ. DLA MACH 11	282
0227400801	PŁYTA, 8 POZ. DLA MACH 11	378

PŁYTA POJEDYNCZA



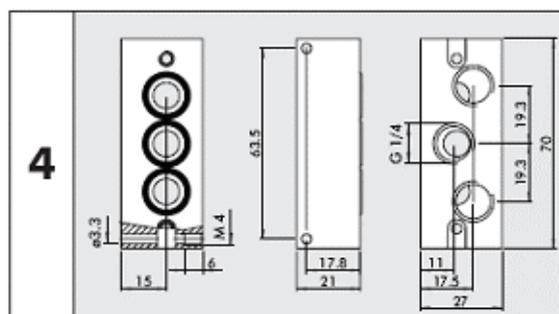
Indeks	Opis	Masa [g]
0227400200	PŁYTA POJEDYNCZA DLA MACH 11	44

PŁYTA KOŃCOWA 90°



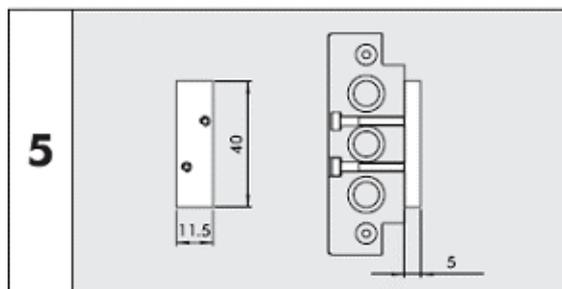
Indeks	Opis	Masa [g]
0227400101	PŁYTA KOŃCOWA 90° 1/4 DLA MACH 11	82

PŁYTA KOŃCOWA PROSTA



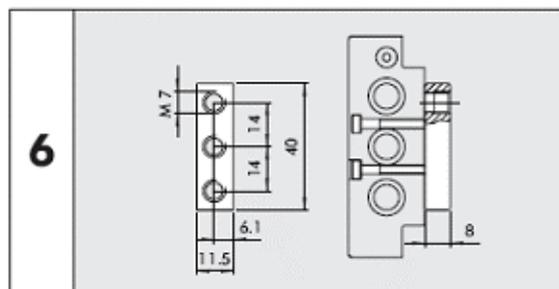
Indeks	Opis	Masa [g]
0227400100	PŁYTA KOŃCOWA PROSTA 1/4 DLA MACH 11	93

PŁYTA ZAŚLEPIAJĄCA



Indeks	Opis	Masa [g]
0227400500	PŁYTA ZAŚLEPIAJĄCA DLA MACH 11	13

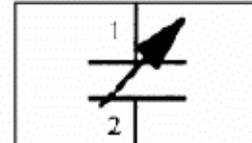
BLOK ZASILAJĄCY



Indeks	Opis	Masa [g]
0227400503	BLOK ZASILAJĄCY M7 DLA MACH 11	11

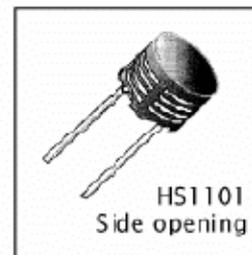
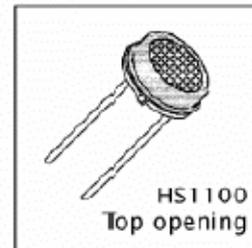


Basados en una única célula capacitiva, estos sensores de humedad relativa están diseñados para grandes volúmenes y aplicaciones de bajo costo como oficinas automatizadas, cabinas de aviones, sistemas de mando de procesos industriales. También pueden utilizarse en todas las aplicaciones donde la compensación de humedad sea necesaria.



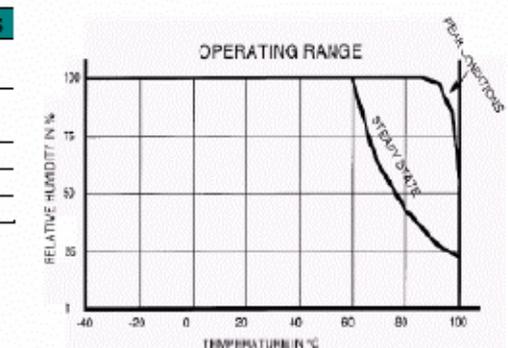
Características

- Intercambiabilidad total, en condiciones normales no requiere calibración
- Desaturación instantánea después de largos periodos en fase de saturación
- Compatible con el proceso de montajes automatizados, incluso soldadura por ola
- Alta fiabilidad y largo tiempo de estabilidad
- Estructura de polímero sólido patentada
- Apropiado para circuitos lineales o de impulsos
- Tiempo de respuesta rápido



VALORES MÁXIMOS (Ta = 25°C)

Rango	Símbolo	Valor	Unidades
Temperatura de trabajo	Ta	-40 a 100	°C
Temperatura de Almacenamiento	Tstg	-40 a 125	0C
Tensión de alimentación	Vs	10	Vac
Rango de humedad ede trabajo	RH	0a 100	%RH
Suelda @ T=260°C	T	10	S

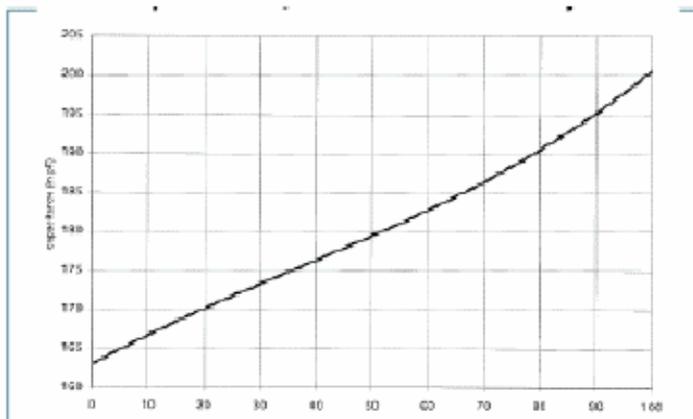


CARACTERÍSTICAS

(a temperatura ambiente $T_a = 25^\circ\text{C}$, frecuencia de la medida @ 10kHz a se indique lo contrario)

Característica	Símbolo	Mín	Typ	Max	Unidades
Rango de medida de la humedad	RH	1		99	%
Tensión de alimentación	V_s		5	10	V
Capacidad nominal @ 55%RH	C	177	180	183	PF
Coefficiente de temperatura	T_{cc}		0.04		PF/ $^\circ\text{C}$
Sensibilidad media de 33% a 75% RH	$\Delta C/\%RH$	0,34			PF/%RH
Corriente de fuga ($V_{cc}=5V$)	I_x		1		nA
Tiempo de la recuperación después de 150 horas de condensación	T_r		10		s
Histéresis de humedad			+/-1.5		%
Estabilidad de largo tiempo			0.5		% RH/yr
Tiempo de respuesta (33 a 76% RH, todavía aire @63%)	T_a		5		s
Desviación en la curva (10% a 90% RH)			+/-2		% RH

Curva Respuesta Típica de HS1100/HS1101 respecto a la humedad



Los datos de la calibración son identificables en NIST

Las normas a través del laboratorio de CETIAT.

La frecuencia de la medida: 10kHz

$T_a = 25^\circ\text{C}$

Polinomio de Respuesta: $C(\text{pF}) = C@55\% * (1.25 \cdot 10^{-7} RH - 1.36 \cdot 10^{-5} RH^2 + 2.19 \cdot 10^{-3} RH + 9.0 \cdot 10^{-1})$

Influencia de frecuencia de medida

Todos los datos de la curva de capacidad se han medido a @10kHz. Sin embargo, el sensor puede trabajar sin restricciones de 5kHz a 100kHz. Para calcular la influencia de la frecuencia en la medida de la capacidad aplicar la expresión:

$$C@ \text{fkHz} = C @ 10 \text{ kHz} (1.027 - 0.01185 \ln(\text{fkHz}))$$

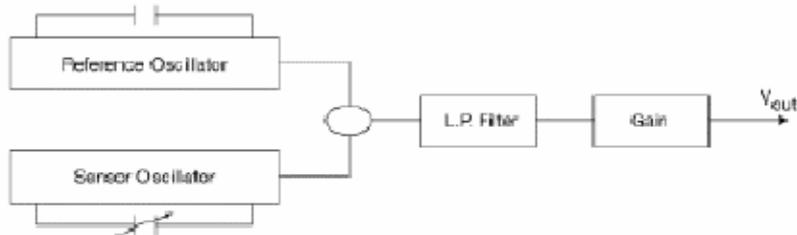
Polarización

Para conseguir una buena respuesta durante las medidas, conectar siempre el encapsulado (pin2) a la tierra del circuito. El chasis se localiza en el lado opuesto de la etiqueta.

Las instrucciones soldado: ver la nota de Aplicación HPC007 VA

TENSIÓN DE SALIDA PROPORCIONAL

Diagrama de bloques interno



$$V_{out} = V_{cc} * (0.00474 * \% RH + 0.2354)$$

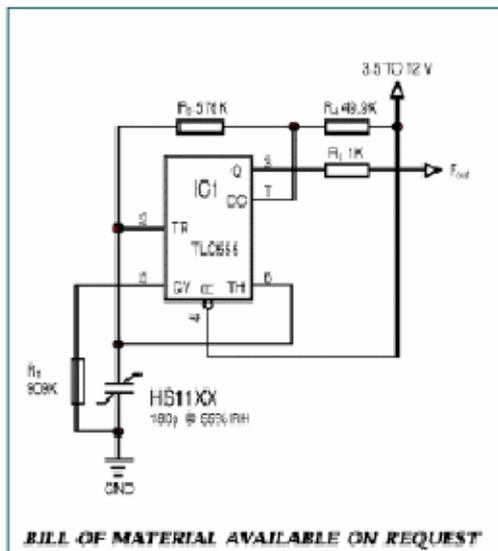
para 5 - 99% RH

Coefficiente de temperatura típico:
+0.1% RH/°C - From 10 to 60°C

Característica típica de tensión de salida del circuito

RH	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Tensión (V)	-	1.41	1.65	1.89	2.12	2.36	2.60	2.83	3.07	3.31	3.55

FRECUENCIA DE SALIDA DEL CIRCUITO



COMENTARIOS

Este Circuito es el montaje típico como multivibrador astable diseñado para un 555. El HS110/HS1101, se utiliza como condensador variable, se conecta a las entradas TRIG (2) y THRES (6) y al pin 7 se conecta la resistencia R4. El condensador equivalente formado por el HS110/HS1101 se carga a través de R2 y R4 hasta llegar a la tensión umbral (aproximadamente 0.67 Vcc) y se descarga solo a través de R2 hasta llegar a la tensión de Trigger (aproximadamente 0.333 Vcc) ya que en descarga la resistencia R4 está conectada a tierra a través del pin 7 (transistor en saturación).

La carga y descarga del sensor a través de las resistencias R2 y R4 determinan el ciclo de trabajo de acuerdo con la expresión:

$$t_{high} = C @ \% RH * (R2 + R4) * \ln 2$$

$$t_{low} = C @ \% RH * R2 * \ln 2$$

$$F = 1/(t_{high} + t_{low}) = 1/(C @ \% RH * (R4 + 2 * R2) * \ln 2)$$

$$\text{Output duty cycle} = t_{high} * F = R2/(R4 + 2 * R2)$$

Para proporcionar un ciclo de trabajo cercano al 50%, el valor de R4 debe ser muy baja comparado a R2 pero nunca se consigue.

La resistencia R3 protege contra cortocircuitos. El 555 debe ser una versión CMOS.

OBSERVACIÓN

La resistencia R1 desequilibra la compensación de temperatura interna del 555 e introduce un coeficiente de temperatura emparejado al del HS1100/HS1101. Esta resistencia debe ser siempre del 1% con un coeficiente de temperatura de 100ppm como la red R-C. La compensación de temperatura interior del 555 cambia de un fabricante a otro, el valor de R1 debe adaptarse al chip específico. Para mantener la frecuencia nominal de 6660Hz al 55%RH, R2 también hay que ajustarla de acuerdo con los datos de la tabla.

Tipo de 555	R1	R2
TLC555 (Texas)	909K Ω	576K Ω
TS555 (STM)	100nF condensador	523K Ω
7555(Harris)	1732K Ω	549 K Ω
LMC555(National)	1238 K Ω	562 K Ω

Tabla para una frecuencia de 6660Hz y 55%RH

Característica típica par frecuencia de salida

Punto de referencia a 6660KHz para 55%RH/25°C

RH	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Frecuencia	7351	7224	7100	6976	6853	6728	6600	6468	6330	6186	6033

Típica para 555 CMOS del tipo TLC555 (RH: Humedad relativa en %, F:Frecuencia en Hz)

Polinomio de respuesta:

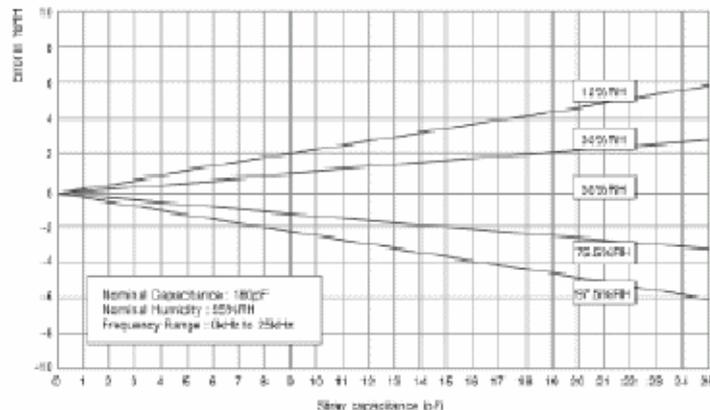
$$F_{\text{res(Hz)}} = F_{55 \text{ (Hz)}} (1.1038 - 1.9368 \cdot 10^{-3} \cdot RH + 3.0114 \cdot 10^{-6} \cdot RH^2 - 3.4403 \cdot 10^{-8} \cdot RH^3)$$

Error de medida

Desviación de la Capacidad

Hay que tener un cuidado especial para minimizar la pérdida de capacidad en el circuito.

Los condensadores que se agreguen actúan como un condensador en paralelo con el sensor y crea un error de medida.



PROCESO DE CALIDAD

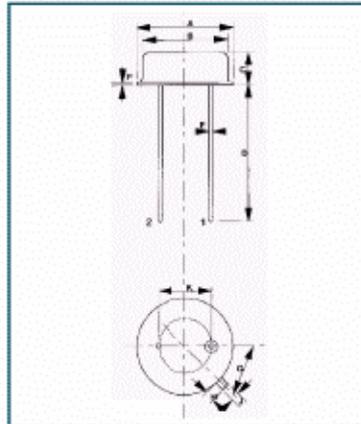
Los sensores HS1100/HS1101 se fabrican bajo un proceso de calidad total teniendo en cuenta los requisitos de la norma MIL STD750 incluyendo:

- Calor de soldadura y soldaduravilidad
- Soldadura por ola a 260°C + DI limpieza con agua a 45°C
- Choque mecánico – 1500 g, 5 golpes, en las 3 direcciones
- Vibración variable (F= 100 – 20.000Hz), fija (F=35Hz)
- Aceleración constante
- Señal permanente
- ESD- Descarga Electrostática- cuerpo Humano y modelo Máquina
- Atmósfera salina MIL STD750/Method 1041/96 horas

- Ciclo de temperatura .40°C/+70°C
- Alta temperatura/Humedad vida útil durante – 93%RH / 60°C durante 1000 horas
- Vida de almacenamiento a baja humedad - RH <10%/23°C - 1000 horas
- Resistencia a la inmersión en agua a una temperatura de 80°C durante 160 horas
- Resistencia a vapores ácidos a 75000 ppm para nítrico, sulfúrico y clorhídrico.
- Resistencia a muchas sustancias químicas juntas utilizadas en el hogar, automóviles y aplicaciones de consumo.

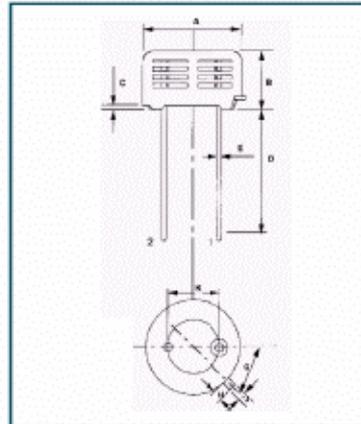
Todas estas pruebas se han realizando tomando muchas veces tres muestras de cada 45 sensores.

**PACKAGE
OUTLINE
HSI 100**



Dimension	Min (mm)	Max (mm)
A	9.00	9.30
B	8.00	8.50
C	3.50	3.90
D	12.00	14.00
E	0.40	0.50
G	45° BCS	
H	0.70	1.10
J	0.70	0.90
K	4.83	5.33
L	0.4 BCS	

**PACKAGE
OUTLINE
HSI 101**



Dimension	Min (mm)	Max (mm)
A	9.70	10.20
B	5.70	6.20
C	0.40	0.60
D	12.00	14.00
E	0.40	0.50
G	45° BCS	
H	0.70	1.10
J	0.70	0.90
K	4.83	5.33

Para más información sobre estos transductores de humedad, se recomienda visitar el website del fabricante, www.humirel.com

LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CE} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator damps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$

- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

Features

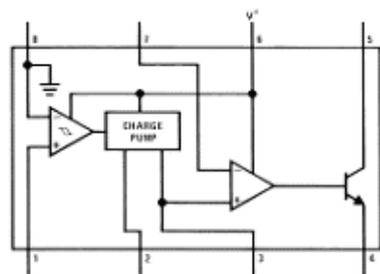
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs
- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$ linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

Applications

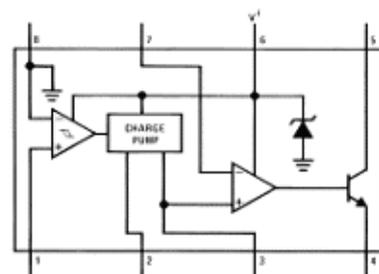
- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

Block and Connection Diagrams

Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views

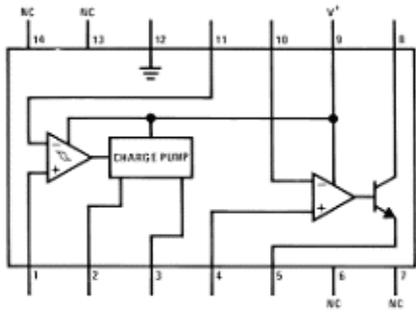


Order Number LM2907M-8 or LM2907N-8
See NS Package Number M08A or N08E



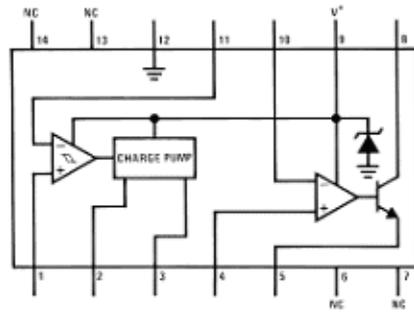
Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8
See NS Package Number M08A or N08E

Block and Connection Diagrams Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views (Continued)



00794208

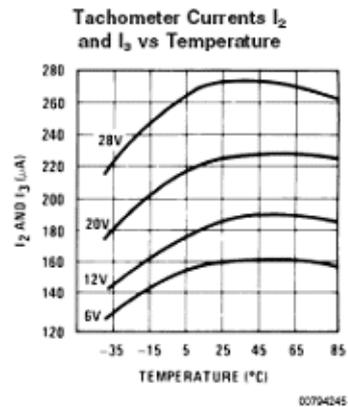
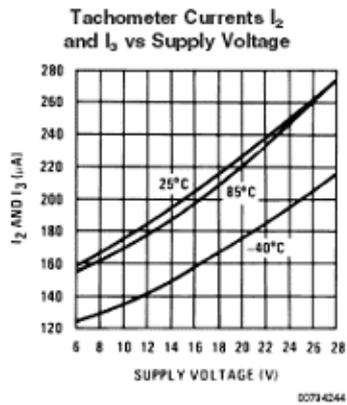
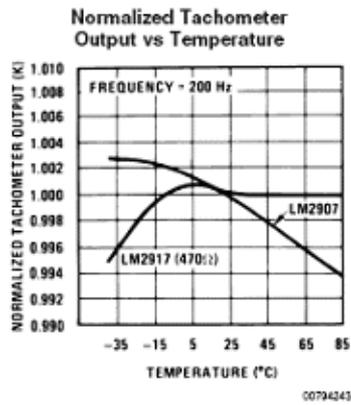
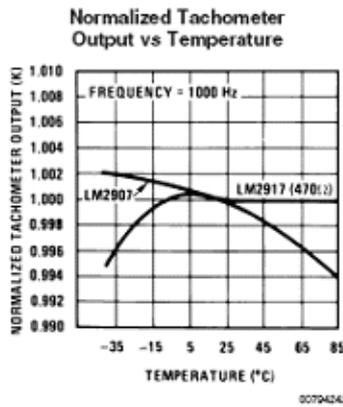
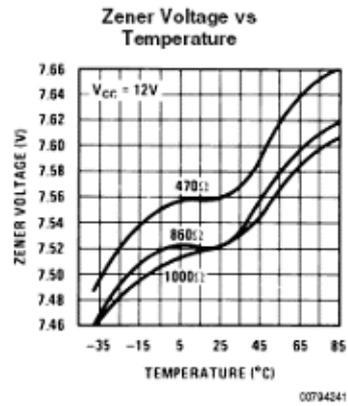
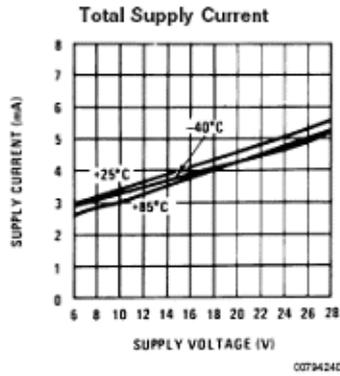
Order Number LM2907M or LM2907N
See NS Package Number M14A or N14A



00794204

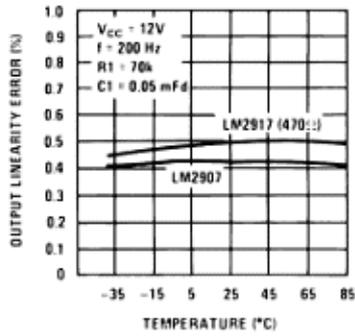
Order Number LM2917M or LM2917N
See NS Package Number M14A or N14A

Typical Performance Characteristics



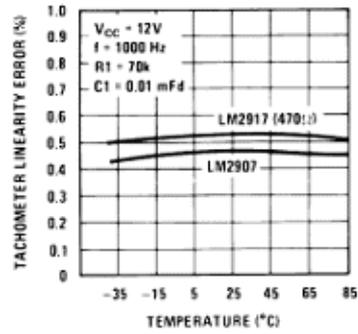
Typical Performance Characteristics (Continued)

Tachometer Linearity vs Temperature



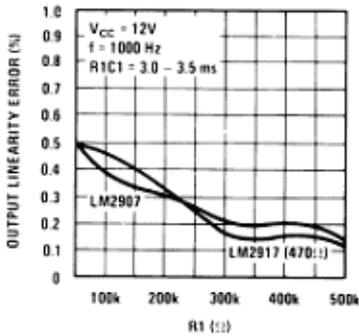
00794248

Tachometer Linearity vs Temperature



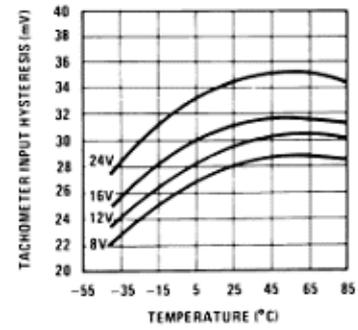
00794247

Tachometer Linearity vs R1



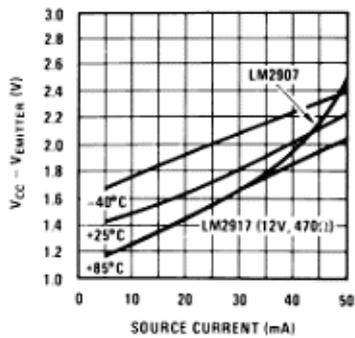
00794248

Tachometer Input Hysteresis vs Temperature



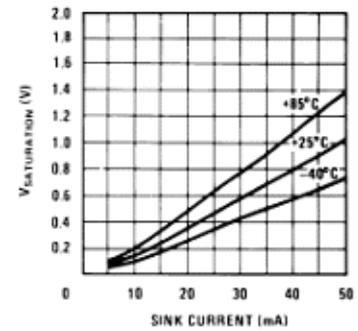
00794249

Op Amp Output Transistor Characteristics



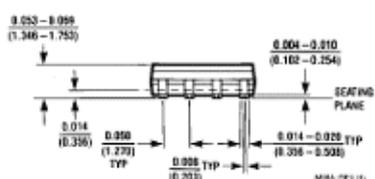
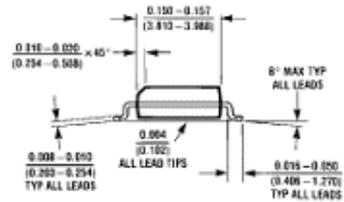
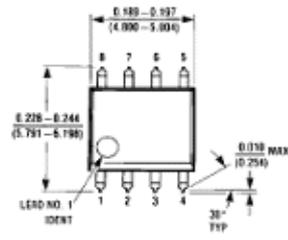
00794250

Op Amp Output Transistor Characteristics

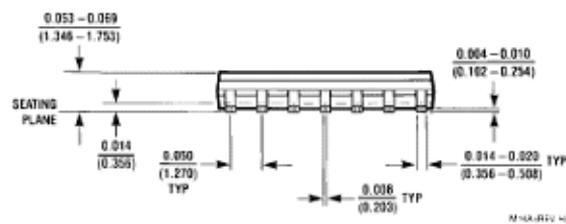
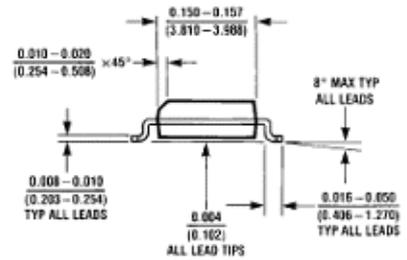
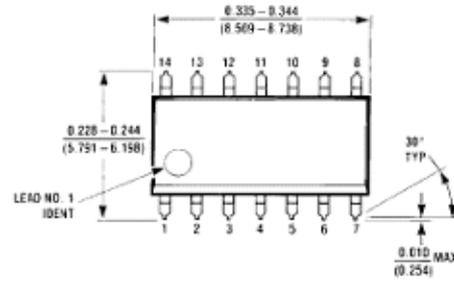


00794251

Physical Dimensions inches (millimeters)
unless otherwise noted



8-Lead (0.150" Wide) Molded Small Outline Package, JEDEC
Order Number LM2907M-8 or LM2917M-8
NS Package Number M08A



Molded SO Package (M)
Order Number LM2907M or LM2917M
NS Package Number M14A



Order this document by ULN2803/D

Octal High Voltage, High Current Darlington Transistor Arrays

The eight NPN Darlington connected transistors in this family of arrays are ideally suited for interfacing between low logic level digital circuitry (such as TTL, CMOS or PMOS/NMOS) and the higher current/voltage requirements of lamps, relays, printer hammers or other similar loads for a broad range of computer, industrial, and consumer applications. All devices feature open-collector outputs and free wheeling clamp diodes for transient suppression.

The ULN2803 is designed to be compatible with standard TTL families while the ULN2804 is optimized for 6 to 15 volt high level CMOS or PMOS.

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ and rating apply to any one device in the package, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Output Voltage	V_O	50	V
Input Voltage (Except ULN2801)	V_I	30	V
Collector Current – Continuous	I_C	500	mA
Base Current – Continuous	I_B	25	mA
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to +70	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$
Junction Temperature	T_J	125	$^\circ\text{C}$

$R_{\theta JA} = 55^\circ\text{C/W}$

Do not exceed maximum current limit per driver.

ORDERING INFORMATION

Device	Characteristics		
	Input Compatibility	$V_{CE}(\text{Max})/I_C(\text{Max})$	Operating Temperature Range
ULN2803A	TTL, 5.0 V CMOS	50 V/500 mA	$T_A = 0 \text{ to } +70^\circ\text{C}$
ULN2804A	6 to 15 V CMOS, PMOS		

ULN2803 ULN2804

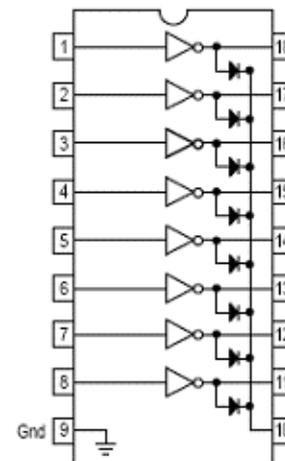
OCTAL PERIPHERAL DRIVER ARRAYS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



A SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 707

PIN CONNECTIONS



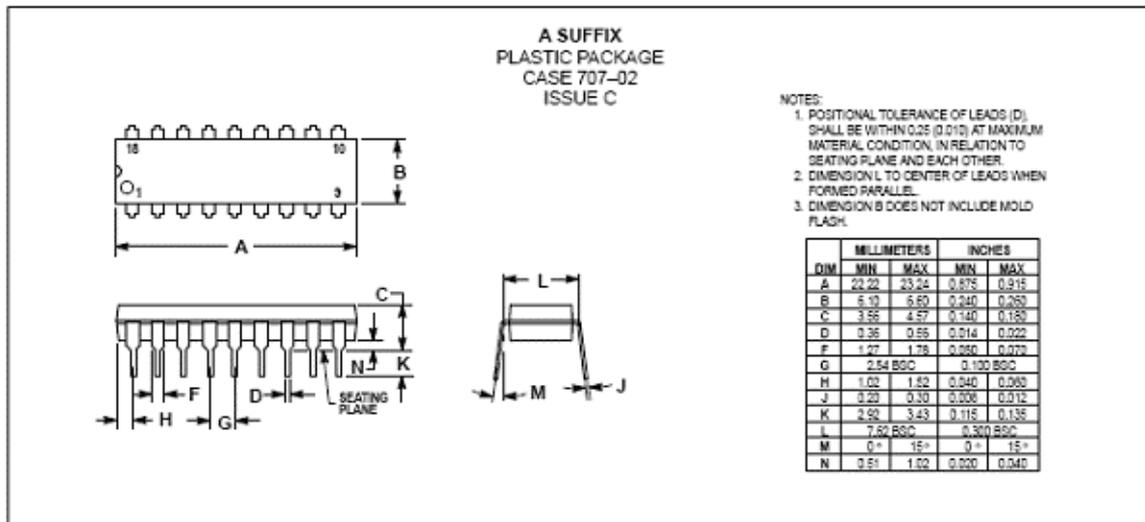
ULN2803 ULN2804

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

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Leakage Current (Figure 1) ($V_O = 50\text{ V}$, $T_A = +70^\circ\text{C}$) ($V_O = 50\text{ V}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$) ($V_O = 50\text{ V}$, $T_A = +70^\circ\text{C}$, $V_I = 6.0\text{ V}$) ($V_O = 50\text{ V}$, $T_A = +70^\circ\text{C}$, $V_I = 1.0\text{ V}$)	I_{CEX}	–	–	100 50 500 500	μA
Collector–Emitter Saturation Voltage (Figure 2) ($I_C = 350\text{ mA}$, $I_B = 500\text{ }\mu\text{A}$) ($I_C = 200\text{ mA}$, $I_B = 350\text{ }\mu\text{A}$) ($I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 250\text{ }\mu\text{A}$)	$V_{CE(sat)}$	–	1.1 0.95 0.85	1.6 1.3 1.1	V
Input Current – On Condition (Figure 4) ($V_I = 17\text{ V}$) ($V_I = 3.65\text{ V}$) ($V_I = 5.0\text{ V}$) ($V_I = 12\text{ V}$)	$I_{I(on)}$	–	0.82 0.93 0.35 1.0	1.25 1.35 0.5 1.45	mA
Input Voltage – On Condition (Figure 5) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 300\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 250\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 300\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 125\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 275\text{ mA}$) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 350\text{ mA}$)	$V_{I(on)}$	–	–	13 2.4 2.7 3.0 5.0 6.0 7.0 8.0	V
Input Current – Off Condition (Figure 3) ($I_C = 500\text{ }\mu\text{A}$, $T_A = +70^\circ\text{C}$)	$I_{I(off)}$	50	100	–	μA
DC Current Gain (Figure 2) ($V_{CE} = 2.0\text{ V}$, $I_C = 350\text{ mA}$)	h_{FE}	1000	–	–	–
Input Capacitance	C_I	–	15	25	pF
Turn–On Delay Time (50% E_I to 50% E_O)	t_{on}	–	0.25	1.0	μs
Turn–Off Delay Time (50% E_I to 50% E_O)	t_{off}	–	0.25	1.0	μs
Clamp Diode Leakage Current (Figure 6) ($V_R = 50\text{ V}$)	I_R	–	–	50 100	μA
Clamp Diode Forward Voltage (Figure 7) ($I_F = 350\text{ mA}$)	V_F	–	1.5	2.0	V

ULN2803 ULN2804

OUTLINE DIMENSIONS



ULN2803 ULN2804

TYPICAL CHARACTERISTIC CURVES – $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted
Output Characteristics

Figure 8. Output Current versus Saturation Voltage

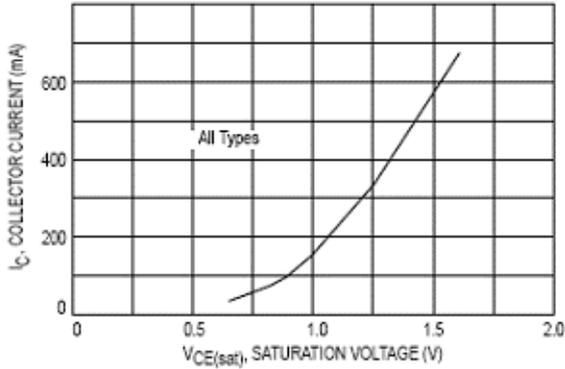
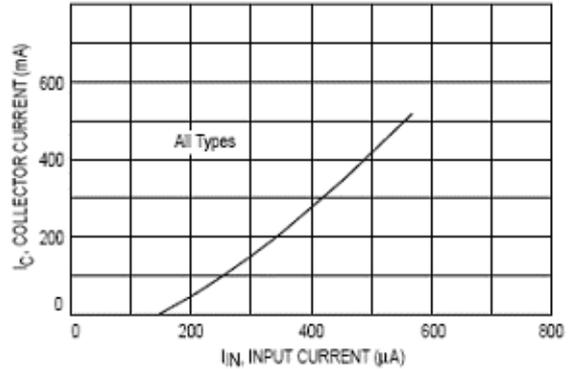


Figure 9. Output Current versus Input Current



Input Characteristics

Figure 10. ULN2803 Input Current versus Input Voltage

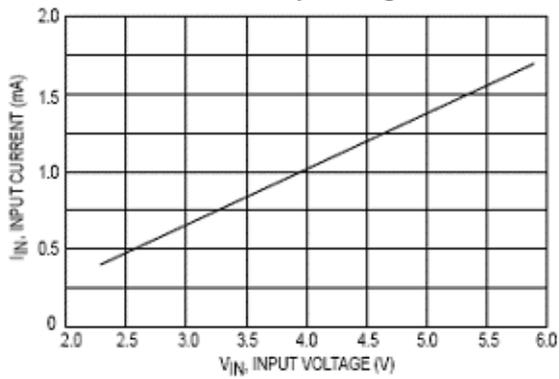


Figure 11. ULN2804 Input Current versus Input Voltage

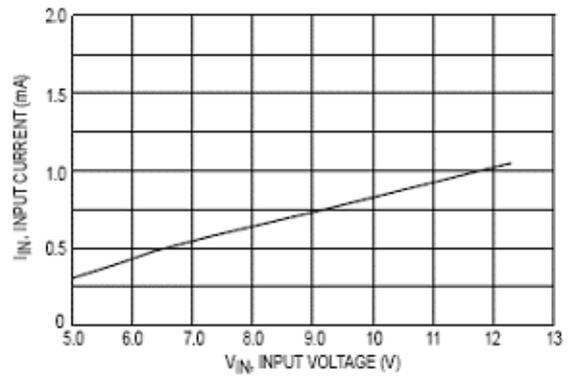
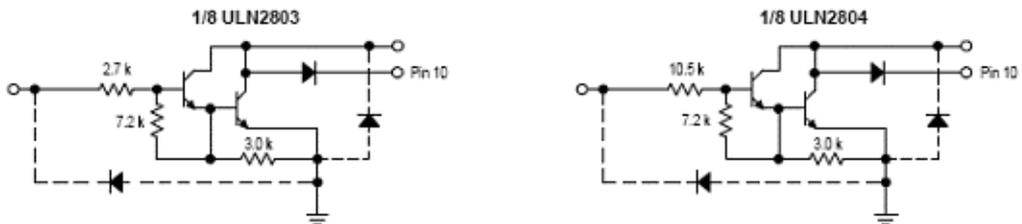


Figure 12. Representative Schematic Diagrams



Latacunga, Agosto del 2008

ELABORADO POR:

IVAN PATRICIO GALLARDO BUSTILLOS

ING. ARMANDO ÀLVAREZ
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA E
INSTRUMENTACIÓN.

DR. EDUARDO VÁZQUEZ
SECRETARIO ACADÉMICO