



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

**ÁREA DE ENERGÍAS, INDUSTRIAS Y RECURSOS  
NATURALES NO RENOVABLES**

**INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

# **Tesis de Grado**

**CONTROL DEL SEGUIMIENTO DE UN ESPEJO CILÍNDRICO  
PARABÓLICO ACCIONADO CON HIDROSEGUIDOR**

*Previo a la realización de la tesis  
de grado y válido para la  
obtención del título de ingeniero  
electromecánico*

***Autor:***

**Felipe Eduardo Barrazueta Carrión**

***Director:***

**Ing. Thuesman Montaña Peralta**

**Loja-Ecuador  
2004**

## **DECLARACIÓN DE AUTOR:**

*Yo, Felipe Eduardo Barraqueta Carrión, autor de este trabajo de tesis: **Control del Seguimiento de un Espejo Cilíndrico – Parabólico accionado con Hidroseguidor**, certifico la propiedad intelectual a favor de la Universidad Nacional de Loja (República del Ecuador), la cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad académica que estime conveniente.*

---

*Felipe Eduardo Barraqueta Carrión*

***Autor***

## PENSAMIENTO

*“La ciencia es buena porque nos enseña a distinguir por medio de la acción lo posible y lo imposible, porque nos instruye al respecto de nuestros verdaderos deberes y nos liberta de la servidumbre de la ignorancia y el error”.*

**Anatole France**

*“El camino del conocimiento conduce hacia la victoria; el de la ignorancia, hacia la derrota”.*

**Anónimo**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo, está dedicado con mucho amor y cariño especialmente a Dios, a mis padres, Carlos Ernesto y Lilia Maria, a mis hermanos, a mis familiares y a todos aquellos que me brindaron su apoyo en cada momento mi vida, para que siguiera adelante, ya fueran tiempos buenos o malos.*

*Felipe Eduardo*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco especialmente a mi tutor Dr Manuel García Renté, quién me orientó y me brindó su apoyo y dedicación en la realización de este trabajo.*

*Al Director de tesis el Ing Thuesman Montaña Peralta quien supo guiarme por el buen camino y enseñarme con su ejemplo, perseverancia, paciencia y dedicación.*

*A la Universidad Nacional de Loja y al Instituto Minero Metalúrgico Dr Antonio Núñez Jiménez por haberme dado la oportunidad de realizar el presente trabajo.*

*Al colectivo de profesores de las nobles instituciones UNL y ISMM.*

*A mis compañeros de aula y a todos aquellos que cooperaron en el desarrollo de este trabajo.*

**Muchas gracias a todos.**

## **RESUMEN**

*El presente trabajo consiste en el control del seguimiento de un espejo cilíndrico-parabólico accionado con Hidroseguidor durante la carga y descarga libre del agua con la finalidad de captar la mayor cantidad posible de energía en un determinado lugar. Se consigue que el plano de entrada del espejo sea lo más perpendicular posible a los rayos solares.*

*El sistema de control se diseña a partir de la modelación y simulación en MATLAB de los diferentes bloques previamente identificados del sistema de control. El sistema se diseña para las condiciones geográficas y climatológicas de Loja – Ecuador.*

*El sistema de Hidroseguidor, especialmente en lo que concierne a sus cálculos y modelación matemática está establecido como una continuación y aporte al diseño del Hidroseguidor planteado por el Ing. Darwin Soto Bustamante en su investigación de grado denominada “Metodología para el hidroseguimiento de paneles fotovoltaicos accionados por carga y descarga libre del agua” (en techos).*

## **SUMMARY**

*The present work consists on the control of the pursuit of a cylindrical-parabolic mirror worked with Hydropursuit during the free load and discharge of the water with the purpose of capturing the biggest possible quantity of energy. It is gotten that the plane of entrance of the mirror be the most perpendicular possible to the solar rays. And therefore, an appropriate reception can be gotten if this surface this endowed with a movement of pursuit of the sun.*

*The control system is designed starting from the modelation and simulation in MATLAB of the different previously identified blocks of the control system. The system is designed for the geographical and climatological conditions of Loja - Ecuador.*

*The system of Hidroseguidor, especially concerning their calculations and mathematical modelación it is established as a continuation and contribution to the design of the Hidroseguidor outlined by the Engineer Darwin Soto Bustamante in their denominated grade investigation "Methodology for the hidroseguimiento of photovoltaic panels worked by load and discharge free of the water" (in roofs).*

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>Certificación</b>	<b>II</b>
<b>Autoría</b>	<b>III</b>
<b>Pensamiento</b>	<b>IV</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>V</b>
<b>Agradecimiento</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Summary</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>I : Fundamentación Teórica</b>	
1.1.0 La crisis energética.....	6
1.2.0 Desarrollo sostenible.....	7
1.3.0 Emisiones de carbono.....	7
1.4.0 La luz.....	8
1.5.0 Energía solar.....	9
1.6.0 Energía solar fotovoltaica.....	10
1.6.1 Dispositivos.....	12
1.6.2 Convertidores fotovoltaicos.....	12
1.6.3 Células monocristalinas.....	14
1.6.4 Células policristalinas.....	14
1.6.5 Células amorfas.....	15
1.7.0 Aplicación de paneles solares.....	15
1.7.1 La integración fotovoltaica a los edificios.....	15
1.7.2 Componentes de una instalación fotovoltaica.....	16

## **II : Fundamentos Científico Técnicos**

2.1.0	Introducción.....	19
2.2.0	Instalación solar fotovoltaica.....	19
2.2.1	Paneles fotovoltaicos.....	22
2.2.2	Baterías.....	24
2.2.3	Regulador de carga.....	27
2.2.4	Convertidores CDA.....	29
2.3.0	Seguidores solares.....	31
2.3.1	Tipos de seguidores solares.....	32
2.3.2	Hidroseguidores solares.....	35
2.4.0	Componentes del sistema de control de posición del espejo.....	36
2.5.0	Introducción a la modelación matemática.....	48
2.6.0	Controladores.....	50
2.6.1	Tipo de Controladores.....	50
2.7.0	Ajuste óptimo del controlador por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols .....	58
2.8.0	Error a régimen estacionario.....	60
2.8.1	Respuesta del sistema.....	60
2.9.0	Conclusiones.....	62

## **III : Proyecto del Hidroseguiamiento**

3.1.0	Instalación.....	63
3.2.0	Esquema de un módulo de hidroseguiamiento.....	63
3.2.1	Funcionamiento de un módulo de hidroseguiamiento.....	64
3.2.2	Diseño de un módulo de hidroseguiamiento.....	65
3.2.3	Diseño de las poleas y los cables.....	66
3.2.4	Diseño del espejo cilíndrico-parabólico.....	67
3.2.5	Diseño de la caldera del espejo cilíndrico-parabólico.....	75
3.3.0	Celdas fotovoltaicas de concentración.....	78
3.4.0	Diseño de un módulo de hidroseguidores.....	80

3.5.0	Régimen de flujo en el hidroseguidor.....	85
3.6.0	Transmisión en el hidroseguimiento.....	89
3.7.0	Posibles funcionamientos del módulo de hidroseguimiento.....	90
3.7.1	Módulo de hidroseguimiento con recirculación de agua...	90
3.7.2	Módulo de hidroseguimiento sin recirculación de agua....	92
3.7.3	Central solar con hidroseguidores en la pendiente de una loma orientados de norte a sur.....	93
3.8.0	Controles del módulo de hidroseguimiento.....	94
3.9.0	Conclusiones.....	94

#### **IV : Modelación, Simulación y Control**

4.1.0	Introducción.....	95
4.2.0	Diagrama de bloques del sistema de control de la posición del espejo cilíndrico-parabólico.....	95
4.3.0	Esquema en bloques del sistema de control de la posición del espejo cilíndrico-parabólico.....	96
4.4.0	Modelos de los componentes del sistema de control.....	97
4.4.1	Modelo matemático del detector de error.....	98
4.4.2	Modelo específico del motor de CD.....	98
4.4.3	Modelo del hidroseguidor que trabaja por descarga de agua.....	99
4.4.4	Modelo del hidroseguidor que trabaja por carga de agua..	100
4.4.5	Modelo del sistema de transmisión mecánica.....	100
4.5.0	Esquema de bloques del sistema de control.....	101
4.6.0	Representación en SIMULINK del sistema de control.....	101
4.6.1	Ajuste óptimo del controlador por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols.....	101
4.7.0	Resultados experimentales.....	102
4.7.1	Respuesta temporal a las acciones de control.....	102
4.7.2	Errores estacionarios a los ajustes P y PID.....	107
4.7.3	Estabilidad a los ajustes P y PID.....	109

4.7.4	Selección del tipo de acción de control del sistema de seguimiento.....	112
4.7.5	Algoritmo de control.....	112
4.7.6	Arquitectura del sistema de control.....	113
<b>V : Valoración Económica, Social y Medio Ambiental</b>		
5.1.0	Valoración económica.....	114
5.2.0	Valoración social.....	116
5.3.0	Valoración medio ambiental.....	116
<b>Conclusiones</b>		120
<b>Recomendaciones</b>		121
<b>Bibliografía</b>		122
<b>Anexos.</b>		

## **INTRODUCCIÓN:**

En la actualidad es indiscutible el ascendente papel de las Tecnologías de Energías Renovables como una opción para la electrificación rural y el cumplimiento de objetivos estratégicos energéticos, sobre todo en los países en vías de desarrollo. Entre estas tecnologías, los Sistemas Solares Fotovoltaicos han ido abriendo su propio espacio y constituyen ya una importante alternativa; técnicamente, las rústicas instalaciones para la iluminación doméstica de los primeros tiempos se han ido transformando en instalaciones muy profesionales que toman en cuenta muchos detalles importantes.

El desarrollo de las Fuentes Nuevas y Renovables de Energía, FNRE, ha tenido un incremento sustancial en los últimos 20 años debido a dos causas fundamentales: la crisis del petróleo de los años 70 y la preocupación por el deterioro del medio ambiente provocado por los altos niveles de contaminación de la atmósfera, ríos, mares, los agujeros de la capa de ozono, las lluvias ácidas y el efecto invernadero entre otros fenómenos.

Las potencialidades de la FNRE con que cuenta el planeta son tales que superan en miles de veces el consumo energético actual y ofrecen a la humanidad una alternativa ecológicamente limpia para el futuro. El aporte actual de estas fuentes representa solo un 7 % del total de la energía mundial comercializable, 8.0 Gigatoneladas de combustible convencional (Gt cc), de los cuales la mayoría corresponde a las grandes centrales hidroeléctricas. Si tenemos en cuenta los recursos energéticos no comercializables, sobre todo la leña en los países del sur, las energías cubren de un 14 a un 20 % de las necesidades de energía.

Para el aprovechamiento de la energía en especial de la radiación solar se utilizan dos vías: la térmica y la fotovoltaica. La primera incluye la arquitectura solar o bioclimática pasiva, los colectores solares de agua y aire, las cocinas y secadores solares, así como la generación de electricidad mediante ciclos termodinámicos como son las centrales de colectores térmicos distribuidos y los sistemas de torre central.

El presente trabajo, complementa el realizado en el año 2003 por el Ing. Darwin Felipe Soto Bustamante con el tema de investigación de grado titulado: “Metodología para el hidroseguimiento de paneles fotovoltaicos accionados por carga y descarga libre del agua” (en techos),

- **Situación Problemática**

Hoy en día diversos son los problemas fundamentales del hombre tales como: la energía, el medio ambiente, la salud, etc. La explotación desmedida de los combustibles no renovables carbón, petróleo, gas y nuclear han condicionado la vida cotidiana y la evolución del medio ambiente a escala local y mundial.

Por esta razón el planeta se ahoga en la contaminación atmosférica lo que ha ocasionado un deterioro excesivo y significativo de los ecosistemas con el peligro real, a mediano y largo plazo de no satisfacer las necesidades crecientes de la sociedad humana; por tal razón en los estudios sobre posibles alternativas a la crisis energética se cita al sol como un recurso energético, que bien merece ser utilizado con prioridad.

En materia de energías alternativas el Sol es considerado como fuente de energía, por considerarse completamente renovable en cuya intervención los seres humanos no han sabido aprovecharla; es por eso que actualmente existen en el mundo más de 2 000 millones de personas sin acceso a la electricidad, atrapados en un círculo de pobreza y sin poder cubrir sus necesidades básicas.

En nuestro país alrededor de 170 000 de ecuatorianos no disponen de energía eléctrica ni alternativa por lo que la energía solar puede formar parte importante de ese suministro, permitiendo asegurar que los pobres, también tengan acceso a energías limpias y de confianza.

- **Formulación del Problema**

Actualmente es importante para el desarrollo integral del país, el desarrollo de sus regiones urbanas y rurales con el fin de mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

La falta de recursos energéticos en estas regiones y la falta de energía eléctrica han coadyuvado a su subdesarrollo.

Para satisfacer las necesidades básicas de electricidad que mejoraría significativamente la calidad de vida de los ecuatorianos se cita al Sol como una fuente de energía inagotable la cual nos brinda un aproximado diario de 5 000 Wh/m<sup>2</sup>, para poder cubrir la falta de electricidad en zonas alejadas a redes eléctricas la mejor solución que presentamos es la energía fotovoltaica que económica y ecológicamente son recomendables por su fácil mantenimiento y porque minimizan los impactos del cambio climático.

Si bien es cierto la electricidad es cara de producir y de utilizar, sobre todo en los países menos desarrollados pero también es cara de producir en el sentido ecológico pues la mayoría de la electricidad que consumimos hoy se produce a base de carbón y al quemar ese carbón, se lanzan gases como el dióxido de carbono, creando el efecto invernadero.

En este contexto, he creído conveniente realizar la investigación de energía solar, ya que la tecnología disponible no nos permite su aprovechamiento, la alta contaminación ambiental por la quema de combustibles, la falta de energía eléctrica en áreas inaccesibles me motivan a proponer una manera de que la energía solar sea operativa mediante la sincronización eficiente del movimiento de Captadores Solares en la Caldera de Espejos Cilíndricos-Parabólicos con el movimiento aparente del sol para generar la energía necesaria de la Radiación Solar Directa, se constituye una alternativa para generar corriente eléctrica.

- **Hipótesis del Trabajo**

### **Hipótesis General**

Con la implementación de un Hidroseguidor solar se obtendrán un mayor aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

### **Hipótesis Específica**

- Utilizando modelos matemáticos se puede lograr modelar el sistema integral del Hidroseguidor.
- El utilizar espejos cilíndricos-parabólicos permite tener mejores niveles de captación Solar.
- El utilizar métodos no convencionales lleva a la no contaminación ambiental.

- **Objetivos**

- Modelar el sistema de control de seguimiento del sol con espejos cilíndrico-parabólicos.
- Diseñar un sistema de control del seguimiento del sol con espejos cilíndricos-parabólicos.
- Simular en MATLAB el sistema de control.
- Reducir la contaminación ambiental.

Presentar y difundir los resultados del trabajo a la sociedad lojana y a los estudiantes de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja.

- **Objeto de Investigación**

Diseño de un sistema de control del seguimiento del sol con espejos cilíndrico-parabólicos accionados con hidroseguidores, que trabajan con la energía de la gravedad durante la descarga y carga libre del agua.

- **Tareas para Alcanzar el Objetivo**
  - Establecimiento del marco Teórico del Trabajo
  - Modelación del sistema de control
  - Diseño y ajuste del sistema de control
  - Simulación del sistema de control

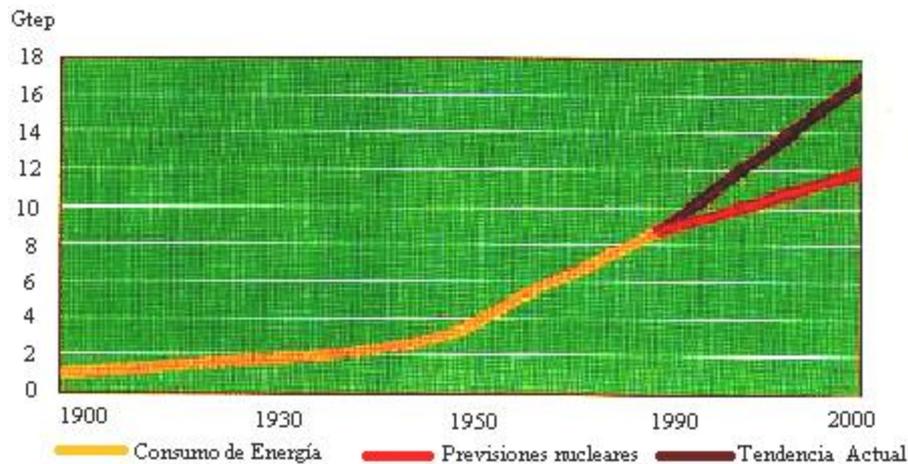
A continuación, analizaremos con más detalles la generación de electricidad a partir de la radiación solar por vía fotovoltaica

# CAPITULO I

## CAPITULO I

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 1.1.0 La Crisis Energética



**Figura 1.1- Evolución del Consumo de Energía**

El trabajo trata básicamente de como sustituir las fuentes de energía convencionales (tales como el gasóleo, el carbón, el gas y la energía nuclear) por la energía solar, la fuente de energía renovable por excelencia, para solucionar así el problema de la crisis energética (figura 1.1), satisfaciendo todas las necesidades del hogar.

Uno de los principales retos de nuestra sociedad es poder disfrutar de las ventajas del progreso y extenderlo por todo el mundo sin comprometer nuestro futuro y haciendo posible un desarrollo sostenido algún día. La tecnología tiene que ser una herramienta al servicio del hombre, que haga posible disfrutar de las nuevas posibilidades que nos ofrece el futuro y respetando nuestro entorno natural.

La tarea es, pues promover aquellas tecnologías que nos pueden permitir vivir mejor ahora y el día de mañana, que nos permitan dejar la herencia de un mundo limpio

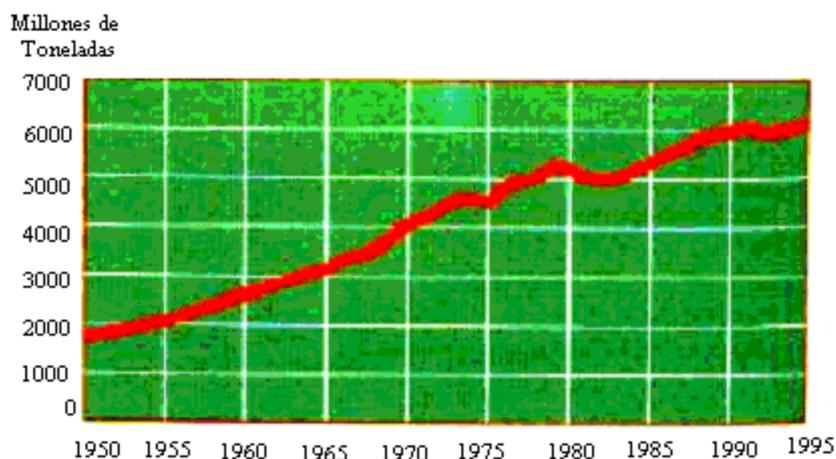
y lleno de posibilidades para nuestros hijos, hará que la humanidad pueda evolucionar sin ser destruida por sí misma.

### 1.2.0 Desarrollo Sostenible

El XVI congreso del Consejo Mundial de Energía que tuvo lugar en Tokio, hizo ver la necesidad de definir una estrategia de desarrollo sostenible a largo plazo, por una parte el inevitable crecimiento de la población que se prevé que en el 2 020 pasará a más de 8 000 millones de personas y a 10 000 en el 2 050, por otra parte le prioridad del desarrollo económico para que todos los pueblos tengan acceso a una calidad de vida aceptable y también está el impacto del desarrollo económico en el medio ambiente, con especial atención al calentamiento del planeta y a las amenazas a la biodiversidad.

Hay que ampliar la gamma de formas de energía disponibles, todos los países llevarán a término una política que contribuya a su financiamiento para llegar a sustituir los combustibles fósiles.

### 1.3.0 Emisiones de Carbono



**Figura 1. 2- Emanaciones de CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles**

El factor que se considera, el de las emisiones de carbono es el más importante. Aunque no hay un acuerdo universal en la comunidad científica sobre a qué ritmo

aumentarán las temperaturas globales y qué efectos específicos tendrán a escala local, sin que exista un consenso sobre el hecho de que no existe ninguna otra alternativa que la reducción de dichas emisiones de carbono.

La combustión de fósiles libera cada año unos 6 000 millones de toneladas de carbono, cifra que representa el 2 % del total de emisiones (figura 1.2). Para que el clima del planeta volviera al equilibrio en los próximos siglos haría falta reducir las emisiones al ritmo que puedan absorber los océanos y los bosques que son de alrededor de 1 000 a 2 000 millones de toneladas al año, lo que significa un 80 % menos que el ritmo actual. Asimismo, la situación real es muy diferente: en el 1 995 la Agencia Internacional de la Energía, previó, que si no cambiaba la situación actual, las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo superarían en el 2 010 en un 30-40 % las emisiones de 1 990. Con el espíritu de evitar eso en la cimera de Kioto se acordó reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, los gases que provocan el efecto invernadero, en un 5 % en el periodo 2 008-2 012.

#### **1.4.0 La Luz**

La luz está formada por dos campos, uno eléctrico y otro magnético, que oscilan perpendicularmente entre sí. La luz se puede comportar de dos formas: de forma ondulatoria y de forma corpuscular, ya que cumple fenómenos relacionados con las dos, por ejemplo: La luz puede ser reflejada, puede atravesar un cristal, da energía a los átomos.

La luz visible es una franja muy estrecha del espectro electromagnético que incluye muchos tipos de onda. Por encima del espectro, visible, es decir, ondas electromagnéticas de una frecuencia mayor que la luz hay los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma, muy peligrosos debido a su alto contenido energético y dado que pueden penetrar casi todas las superficies.

Por debajo del espectro tenemos ondas de radio, televisión, y las microondas, de los hornos microondas, claro.

Cuando la luz interactúa con átomos se comporta como una partícula, esa partícula al chocar con un átomo le da energía, haciendo que los electrones que hay

dentro del átomo asciendan a un nivel superior de energía, para más tarde volver a su posición inicial y emitir energía otra vez.

### 1.5.0 Energía Solar

La energía solar es la energía radiante producida por el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión que llegan a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, se llama constante solar, y su valor medio es de unas  $2 \text{ cal /mi}^2 / \text{cm}^2$ .

El Sol, en concreto la radiación solar interceptada por la tierra en su desplazamiento a su alrededor, constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. Nuestro planeta recibe del Sol la asombrosa cantidad de energía anual de  $5,4 \times 10^{24} \text{ J}$ , una cifra que representa 4 500 veces el consumo mundial de energía. Aunque es muy abundante el aprovechamiento de la radiación solar está condicionada por tres aspectos: la intensidad de radiación solar recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada emplazamiento.

En general la radiación solar hace referencia a los valores de irradiación global, es decir, la unidad de energía recibida por unidad de superficie en un tiempo determinado. Estos valores normalmente hacen referencia a la energía que proviene directamente del disco solar (radiación directa) y la energía que, difundida por la atmósfera, puede llegar al 100 % de la global.

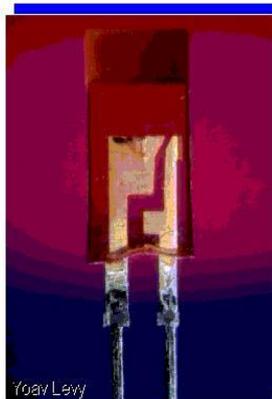
La radiación solar es una forma de energía de baja concentración, fuera de la atmósfera, la intensidad de radiación oscila entre 1 300 y 1 400  $\text{W/m}^2$ . Las pérdidas en la atmósfera por absorción, reflexión y dispersión la reducen un 30 %. Si las condiciones climatológicas son buenas podemos llegar a tener 1000  $\text{W/m}^2$ , aunque si las condiciones son pésimas podemos tener sólo 50  $\text{W/m}^2$ , por eso estamos obligados a utilizar superficies de captación grandes.

### 1.6.0 Energía Solar Fotovoltaica

Quizás el hombre en las últimas décadas (y de alguna otra forma en el último siglo) lo que ha estado buscando es transformar la energía más valiosa de las que existen en la tierra, la energía más extendida y omnipresente; en la energía que pueda transformar en todos los otros tipos de energía; se trata de transformar la energía solar en energía eléctrica, y de ahí en energía rotativa, cinética, electromagnética, calorífica, luminosa o en cualquier otra.

Desde que se descubrió el efecto fotoeléctrico lo único en lo que se han centrado los científicos es en conseguir los mejores rendimientos en la transformación de la energía solar por éste método, no han buscado otras formas de hacer lo mismo, pero es que a lo peor no hay ninguno más.

La transformación susodicha se basa en la consideración de la energía luminosa como cuantos de energía llamados fotones y en la teoría cuántica de Max Planck.

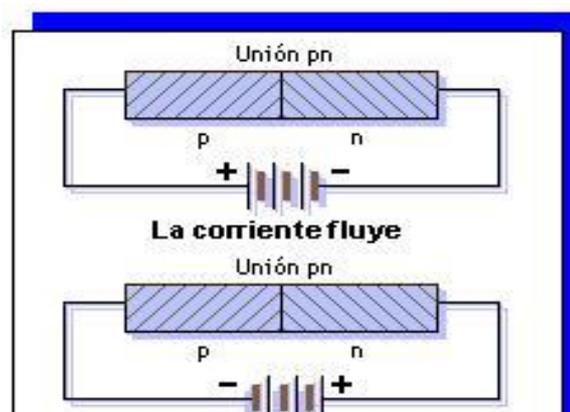


**Figura 1. 3- Diodo Luminoso**

El efecto fotoeléctrico ocurre cuando un material en concreto es irradiado con energía luminosa y genera corriente eléctrica. En un diodo luminoso o Led como el de la (figura 1.3) ocurren los dos efectos tanto el de crear luz con electricidad como el de crear electricidad con la luz.

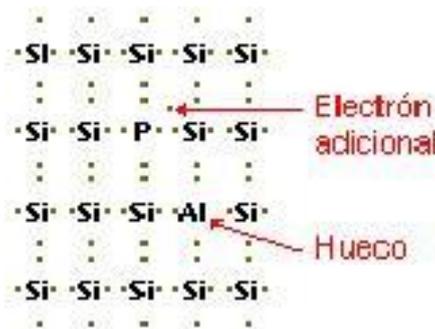
Durante muchos años se ha buscado la mejor forma de generar corriente eléctrica a partir del efecto fotoeléctrico buscando materiales con estas propiedades. Parece ser que el silicio convenientemente modificado es el mejor candidato para esto. Cuando decimos convenientemente modificado es lo que se conoce como el dopado del silicio. Se ha descubierto que construyendo diodos semiconductores de silicio los rendimientos ascienden por encima del 30 %. Un diodo está formado, como su nombre indica por dos partes. Una parte positiva y la otra negativa en la positiva el material se encuentra falto de electrones y a la negativa le sobran. Cuando estas dos partes se unen forman lo que se llama diodo semiconductor (figura 1.4).

Las características principales de éste elemento son que la corriente eléctrica sólo puede circular hacia un sentido, por eso se llama semiconductor. Otra es que a medida que aumenta la temperatura y a diferencia de los materiales conductores el rendimiento aumenta. La última es que también produce efecto fotoeléctrico.



**Figura 1. 4- Diodo Semiconductor**

El silicio por sí solo no tiene ni electrones de más ni de menos, tiene cuatro electrones en la última capa. El dopado consiste en acercar otros materiales contaminantes en menor cantidad o impurezas en un material madre como es en este caso el silicio. Así si introducimos fósforo en el silicio (figura 1.5) se tendrá un electrón de más cada vez, puesto que el fósforo tiene cinco electrones en la última capa y se tiene silicio negativo, por el contrario si introducimos aluminio tendremos un electrón de menos o hueco ya que el aluminio tiene tres electrones en la última capa.



**Figura 1.5- Dopado de Silicio**

Éste proceso puede ser comparado con una mesa de billar americano. Las bolas de billar (incluida la negra) serían los electrones del silicio y los electrones sobrantes de los materiales dopantes; el tapete verde sería la línea que une el silicio positivo con el negativo; a través de los agujeros iríamos a parar a la corriente eléctrica y unos guisantes representan los fotones de la luz.

Pues bien el efecto fotoeléctrico es como poner guisantes y los hiciésemos chocar contra las bolas de billar para intentar que se desplazaran hasta el agujero o hueco más cercano e incorporarse así a la corriente eléctrica.

### 1.6.1 Dispositivos

Hay diferentes dispositivos de conversión directa de energías solar en energía eléctrica como por ejemplo convertidores termoelectrónicos, convertidores termoiónicos y los fotovoltaicos.

De estos tres sólo los fotovoltaicos tienen futuro ya que los otros dos son ineficaces en aplicaciones terrestres a gran escala.

### 1.6.2 Convertidores Fotovoltaicos

Son los más avanzados de todos los convertidores de energía cuántica y constituyen el más prometedor camino hacia la potencia electro-solar. Éste proceso es

llamado también proceso de fotoemisión interna. Se produce fundamentalmente por fotoemisión que posee un umbral inferior a la absorción de fotones y la luz pasa de ser luz a ser electricidad sin pasar antes por un estado de energía térmica. A parte de las células fotovoltaicas existen otras, pero la fotovoltaica es la única que posee una absorción óptica muy alta y una resistencia eléctrica lo suficientemente baja como para poder convertir la energía solar en energía útil de modo económico.

Gracias a que hay una amplia elección de semiconductores con el intervalo apropiado de absorción espectral, podemos seleccionar un material apropiado abarque el espectro solar.

Éstos semiconductores se hacen uniendo partes positivas y negativas de silicio, que actualmente es el que más rinde. Todas las células solares actuales tienen en común tres características:

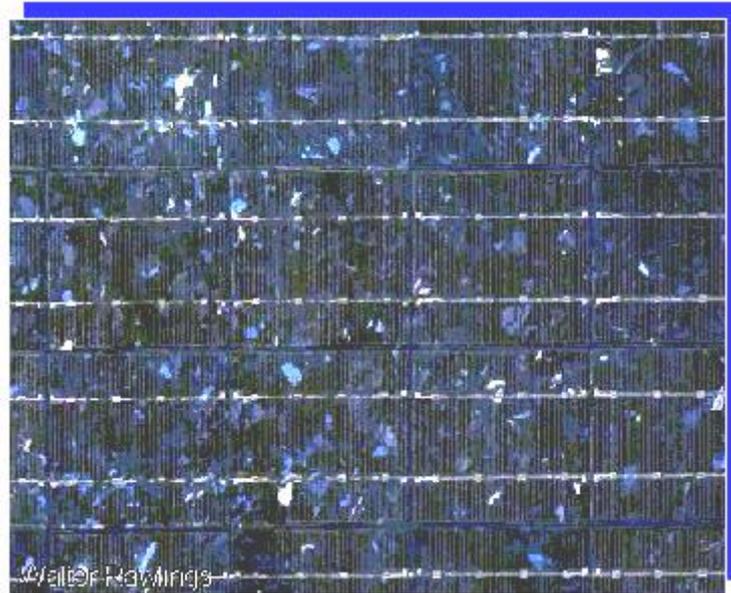
1. Un absorbente óptico que convierte los fotones en pares electrón-hueco.
2. Un campo eléctrico interno que separe estas cargas.
3. Contactos en los extremos del semiconductor para la conexión con una carga externa.

La parte de los convertidores que absorbe los fotones es el semiconductor que se elige de forma que tenga una banda prohibida similar a la del espectro solar. No podríamos coger una célula solar con un valor bajo de energía de banda prohibida aunque pareciera lo ideal para que absorbiese casi todo el espectro, pero la fuerza electromotriz de la célula está limitada por la energía de banda prohibida, y si ésta es pequeña la energía electromotriz también lo será.

Es poco probable que un fotón tenga el doble de energía que el nivel de Fermi por eso siempre sólo habrá un sólo par electrón-hueco por fotón absorbido y la energía en exceso del fotón se disipa.

Hay diferentes tipos de células solares en cuanto proceso de fabricación, rendimiento y precio se refiere:

### 1.6.3 Células Monocristalinas



**Figura 1. 6- Célula Monocristalina**

Son células formadas por un sólo tipo de cristal, son bastante caras y difíciles de conseguir. A pesar de eso, consiguen unos rendimientos muy buenos, los más grandes, superiores al 30 % (figura 1.6).

### 1.6.4 Células Policristalinas

Se construyen básicamente con silicio, mezclado con arsenio y galio, son un agregado de materiales, casi que es como un bizcocho: se agrupan los ingredientes, se mezclan, se ponen en un molde y luego en el horno a una temperatura determinada. Son más sencillas de conseguir y consiguen unos rendimientos nada despreciables (15 %). No duran tanto tiempo pero son perfectas para lugares en los que por las condiciones ambientales, aunque las células sean muy duraderas se rompan igualmente, como la alta montaña, los desiertos etc.

### 1.6.5 Células Amorfas

Las más baratas, menos duraderas y con rendimientos muy bajos de alrededor de un 6% que tienden a cero con el envejecimiento. Son las utilizadas en calculadoras y aparatos por el estilo ya que la energía que proporcionan es muy baja. Se construyen a base de evaporar encima de un cristal en una cámara de efluvios el material semiconductor o foto-reactivo y colocar un par de electrodos en cada una de las unidades correspondientes.

### 1.7.0 Aplicación de Paneles Solares

En los próximos puntos vamos a ver cómo aplicar la teórica a la práctica, integrando paneles solares en edificios etc. e incluyendo todos los aparatos necesarios para el buen funcionamiento de una instalación fotovoltaica.

#### 1.7.1 La Integración Fotovoltaica a los Edificios

A diferencia de las aplicaciones de electrificación rural, donde la energía producida se utiliza para el autoconsumo, las centrales fotovoltaicas dan la energía generada directamente a la red eléctrica, como en cualquier otra central convencional de generación eléctrica.

Durante los últimos años se ha producido un fuerte desarrollo de los sistemas conectados a la red eléctrica e integrada en edificios o en otro tipo de estructuras arquitectónicas como cubiertas o barreras acústicas. Estas instalaciones se pueden considerar pequeñas centrales fotovoltaicas, con la particularidad de que una parte de la energía generada se invierte en el mismo autoconsumo del edificio y la parte excedente se envía a la red. El objetivo de estas instalaciones no es tanto abastecer todos los consumos eléctricos del edificio con la energía de origen fotovoltaico, sino aprovechar las posibilidades arquitectónicas que tanto los tejados como las fachadas de los edificios ofrecen para instalar captadores fotovoltaicos y reducir las necesidades eléctricas exteriores.

Las células fotovoltaicas suelen tener un grosor de entre 200 y 400 micras y una superficie de 8 á 10 cm<sup>2</sup>. En lo que se refiere la potencia que proporcionan los sistemas fotovoltaicos, una misma célula proporciona valores diferentes en variar la intensidad de radiación que recibe, que no se debe confundir con la intensidad del foco emisor, sino que esta intensidad es la cantidad de radiaciones que le llegan, reacuérdesse que la energía depende de la frecuencia.

Por éste motivo, normalmente la potencia nominal de las células se mide en pico Vatios, que es la potencia que puede proporcionar la célula, con una intensidad de radiación constante de 1 000 W/m<sup>2</sup> y a una temperatura de la célula de 25°. Por ejemplo, una instalación de 10 Wp, suministra una potencia de 10 W cuando se le irradia 1 000 W/m<sup>2</sup>. En general una célula individual tiene una potencia nominal de 1Wp, lo que quiere decir que bajo esa radiación proporciona valores de tensión de unos 0,5 V y corrientes de 2 A.

Para obtener potencias utilizables por aparatos de mediana potencia, hace falta unir un cierto número de células con la finalidad de obtener la tensión y la corriente requeridos. La unidad básica de las instalaciones fotovoltaicas es, pues, la placa fotovoltaica, que suele contener entre 20 y 40 células solares para producir corriente continua de 10 o 24 voltios y proporcionar valores de potencia que oscilen entre 50 y 100 W. Para obtener otros valores de tensión y potencia las placas se pueden conectar en serie o en paralelo.

### 1.7.2 Componentes de una Instalación Fotovoltaica

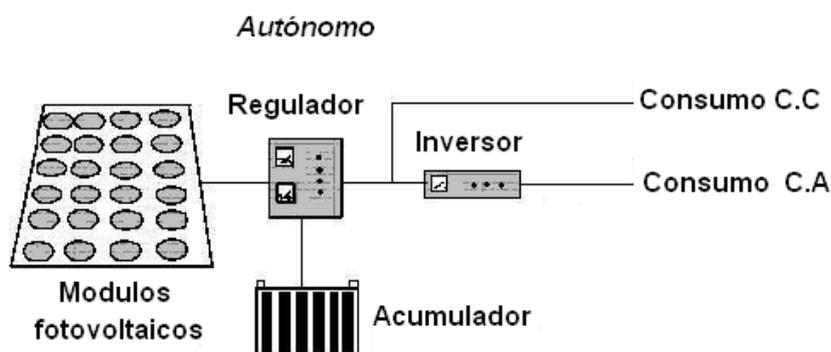


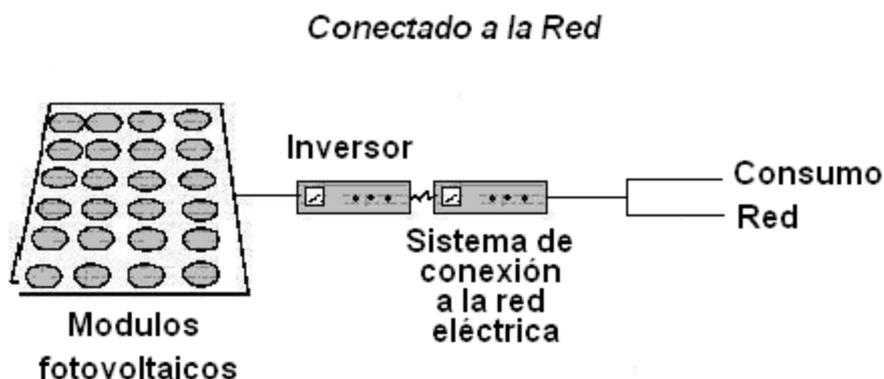
Figura 1.7- Componentes de una instalación fotovoltaica

Los componentes de un sistema fotovoltaico (figura 1.7) dependen del tipo de aplicación que se considere (autónoma o conectada a la red) y de las características de la instalación.

Para el caso de un sistema autónomo, los componentes necesarios para que la instalación funcione correctamente y tenga una elevada fiabilidad de suministro y durabilidad son: Placas fotovoltaicas, acumuladores eléctricos, reguladores de carga e inversores. Por su lado, las instalaciones conectadas a la red de distribución eléctrica se caracterizan por no incorporar acumuladores, ya que la energía que se envía a la red no necesita acumularse.

El principal elemento de una instalación fotovoltaica son las placas solares fotovoltaicas. Estas placas son las que producen electricidad en forma de corriente continuo. Para optimizar su rendimiento hace falta orientar las placas en dirección sur con una inclinación determinada que depende del día mes etc.

La utilización de acumuladores está motivada por el hecho que la intensidad solar varía a lo largo del día y del año, mientras que las necesidades energéticas no lo hacen de manera paralela a estas fluctuaciones, y, por tanto, hay que guardarla. Normalmente se utilizan acumuladores eléctricos, ya que es el sistema más eficiente y económico del que se dispone. Las instalaciones fotovoltaicas utilizan normalmente baterías estacionarias con largos periodos de descarga que se adaptan mejor al régimen de funcionamiento de dichas instalaciones.



**Figura 1. 8- Conexión de un sistema fotovoltaico a la red**

La capacidad de acumular la electricidad necesaria se calcula realizando una media de necesidades y de días de autonomía necesarios, normalmente unas 100 horas. Siempre hay riesgos de quedarse sin energía después de largos días de mal tiempo.

En las instalaciones fotovoltaicas autónomas la función del regulador de carga es proteger los acumuladores contra la sobrecarga y sobredescarga. En caso de sobrecarga, pone las placas en cortocircuito y corta la corriente hacia los acumuladores, o avisa al consumidor con una alarma, en el segundo caso, el de descarga excesiva, avisa con la alarma o corta el suministro cuando la cantidad de energía eléctrica del acumulador se pone por debajo de un nivel de seguridad.

Un buen sistema regulador no sólo hace aprovechar al máximo la energía sino que además protege las baterías y alarga su vida. El otro elemento importante de una instalación fotovoltaica es el grupo convertidor/inversor.

Muchas de las instalaciones fotovoltaicas autónomas combinan consumos de corriente continua y corriente alterna. En algunos casos la tensión de los elementos de consumo de corriente continuo no coincide con la tensión proporcionada por el acumulador de la instalación, la cual cosa requiere disponer de un convertidor de tensión. El inversor por su parte transforma la corriente continua, (12,24 V) generada por la instalación en corriente alterna sinusoidal de 220 V a 50 Hz. que es la corriente que utilizan la mayoría de aparatos.

Los sistemas conectados a la red eléctrica (figura 1.8) no tienen ni reguladores ni acumuladores. Se utilizan onduladores de corriente de mayor potencia que incluyen controles de fase para adecuar la corriente alterna producida al de la red.

# CAPITULO II

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS CIENTÍFICO TÉCNICOS

#### 2.1.0 Introducción

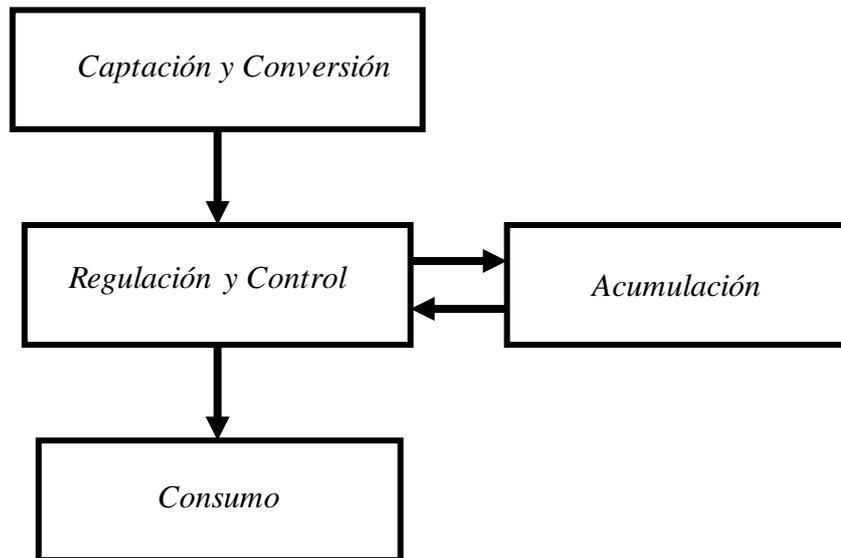
Los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) están conformados por un conjunto de elementos dispuestos de acuerdo con determinados criterios y reglas establecidas por el fundamento de operación y las características del sistema en su conjunto. Estos elementos, de los que resulta imprescindible conocer sus características principales para su correcto diseño y operación.

#### 2.2.0 Instalación Solar Fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica esta agrupada en cuatro subsistemas que detallamos a continuación (figura 2.1).

- **Subsistema de captación energética de la radiación solar y su conversión fotovoltaica.** Conformado básicamente por el panel fotovoltaico o simplemente panel, que a su vez está compuesto por un conjunto de módulos fotovoltaicos.
- **Subsistema de acumulación.** Generalmente compuesto de una batería de acumulación electroquímica u otro tipo de acumulador.
- **Subsistema de regulación y control.** Compuesto por una serie de equipos de accesorios cuya función es la de regular la carga y descarga de la batería de acumulación protegiéndola de sobrecargas y sobredescargas, seguidor del punto máxima potencia, metros contadores, protecciones, etc., que garantizan la operación segura de todo el SFV.

- **Subsistema de consumo.** Formado por todos aquellos equipos que actúan en calidad de consumidores de energía generada y cuya alimentación constituye la finalidad del SFV. Se incluye dentro del SFV debido a las particularidades que presentan sus elementos.



**Figura 2.1- Subsistemas de una Instalación Fotovoltaica**

De los cuatro subsistemas señalados, el determinante es el subsistema de captación energética y conversión fotovoltaica, lo que quiere decir que, en dependencia del tipo SFV, puede faltar cualesquiera otros de los subsistemas, pero la utilización del panel fotovoltaico ya clasifica al conjunto como SFV.

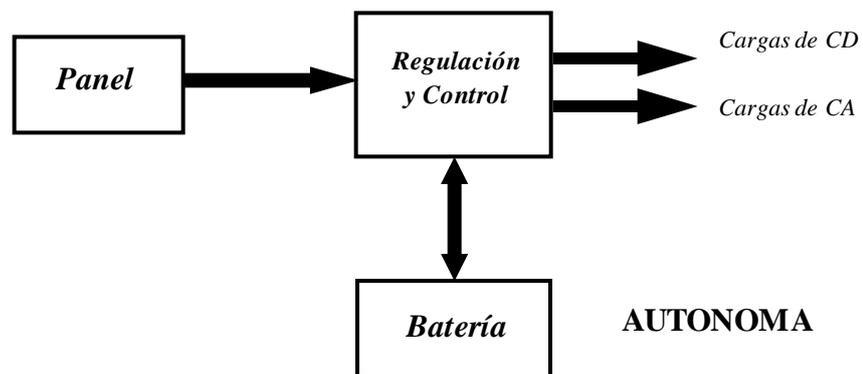
Los SFV se clasifican atendiendo a diferentes aspectos, con este criterio los SFV se clasifican en:

- Autónomos
- Híbridos o mixtos
- Conectados a la red

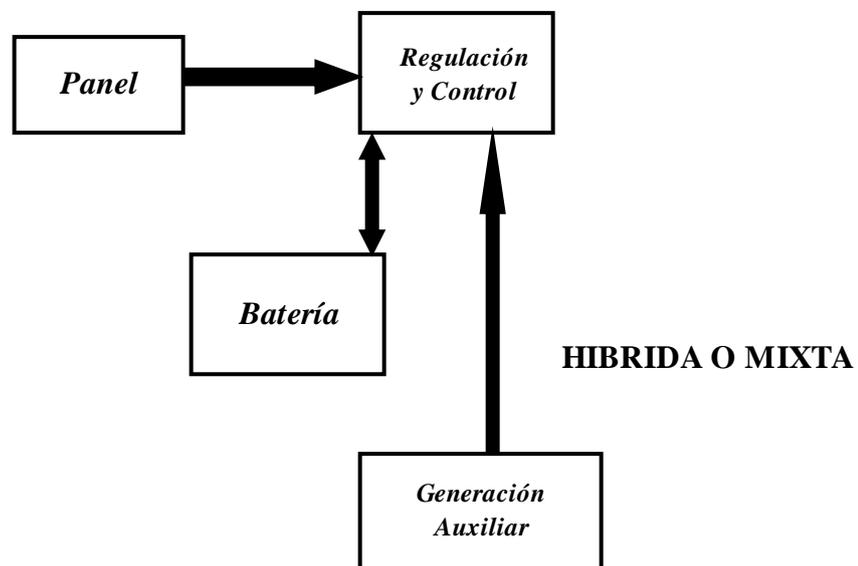
**Autónomos.-** Se denomina autónomos aquellos sistemas que cumplen su función de alimentar una determinada carga de manera independiente y aislada, sin relación alguna con cualquier otra fuente de energía que no sea la radiación solar (ver

anexo 2). Esta posibilidad de SFV los hace sumamente competitivos frente a otros sistemas energéticos. Ellos, sin embargo, presentan en la actualidad dos limitaciones básicas: pueden cubrir necesidades energéticas relativamente bajas y su costo relativamente elevado. Son sistemas extremadamente flexibles en el sentido que puedan adaptarse muy bien a cualquier tipo de aplicación (figura 2.2).

**Sistemas Híbridos.-** Los sistemas híbridos (figura 2.3) se caracterizan porque incluyen alguna fuente adicional de energía, en calidad de complemento, como puede ser un generador eólico, un grupo electrógeno diesel o de gasolina, etc. La razón más importante para la hibridización de los SFV es la reducción del costo de la instalación, aunque en algunos casos se pierde autonomía.



**Figura 2. 2- Sistema fotovoltaico autónomo**



**Figura 2. 3- Sistema fotovoltaico híbrido****CONECTADA A LA RED****Figura 2. 4- Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica**

Los sistemas conectados a la red, normalmente no incluyen el subsistema de acumulación (figura 2.4) pues la energía generada en el panel fotovoltaico se entrega directamente a la red a través de un inversor o convertidor de corriente directa en corriente alterna (CD/CA) con características especiales pues debe admitir las variaciones de voltaje y potencia que entrega el panel, debido a las variaciones e intermitencia de la radiación solar que llega a un determinado punto de la superficie terrestre.

### 2.2.1 Paneles Fotovoltaicos

El panel fotovoltaico es el principal componente del subsistema de captación y conversión de la energía de la radiación solar en electricidad. El esta compuesto por la interconexión de módulos fotovoltaicos (figura 2.5) que a su vez están formados por la interconexión de un conjunto de celdas solares.



**Figura 2.5- Paneles Fotovoltaicos**

Los generadores fotovoltaicos presentan una serie de ventajas.

Entre las cuales se encuentran: su facultad para suministrar electricidad de forma ininterrumpida durante su periodo de vida útil con el costo de operación prácticamente nulo, sin residuos contaminantes excepto calor, la conversión se realiza directamente sin pasar por otras formas intermedias de energía y poseen una alta relación potencia/peso en comparación con otros generadores.

Su principal desventaja radica en su relativamente baja eficiencia actual, lo que determina una pequeña relación potencia/área.

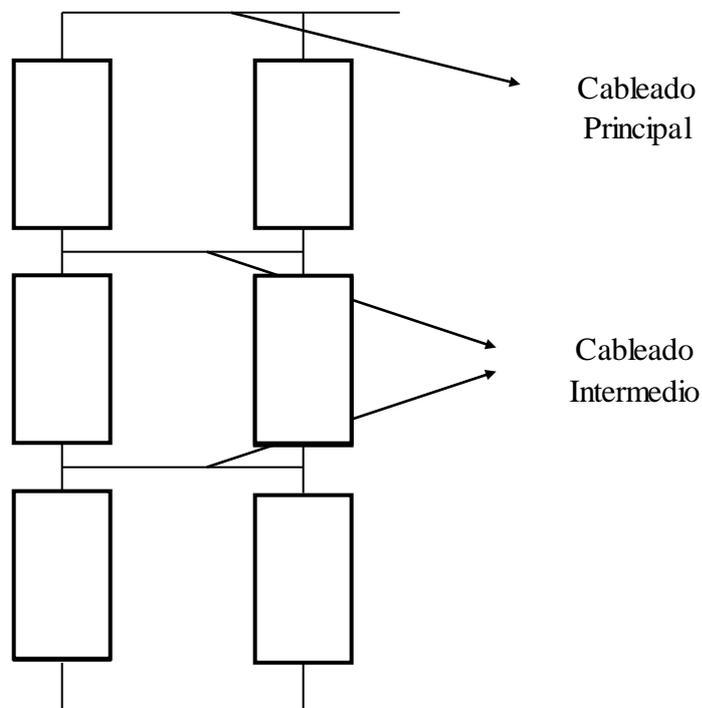
**Configuración del panel Solar Fotovoltaico.-** A partir de la interconexión del conjunto de módulos fotovoltaicos se forma el **panel fotovoltaico** que es la parte principal de subsistencia de captación de la radiación solar y conversión y de todo el SFV.

La interconexión de los módulos puede realizarse, al igual que las celdas, en serie, paralelo o combinaciones de ambas. Por ello deben seguirse una serie de reglas a fin de disminuir las pérdidas de potencia por dispersión de los parámetros de los módulos o la formación de zonas calientes en el panel.

Actualmente la mayoría de los paneles fotovoltaicos se forman asociando primeramente módulos en serie para obtener el valor de la tensión deseado, y luego

asociando en paralelo varios subarreglos serie para alcanzar el valor de la intensidad de corriente necesario, de acuerdo al diseño.

La práctica indica que las pérdidas son mínimas cuando se ordenan los módulos de mayor a menor, tomando en cuenta el valor de la corriente de cortocircuito, para formar las asociaciones serie. También se utiliza el método del cableado intermedio en la formación del panel, como se muestra la (figura 2.6).



**Figura 2. 6- Conexión de paneles fotovoltaicos**

### 2.2.2 Baterías

El problema del almacenamiento de la electricidad generada en el panel fotovoltaico resulta definitorio en la estrategia del diseño y explotación de los SFV. La autonomía de los SFV radica en garantizar la disponibilidad continua de electricidad solar para su consumo. La única vía para lograrlo es almacenando dicha electricidad.

La necesidad de la acumulación está determinada porque el sol se comporta como un generador intermitente, debido a su propia cinemática y al movimiento de la Tierra, así como a la existencia de la atmósfera y los periodos de consumo pueden no coincidir con el. La otra causa está en que la acumulación actúa como estabilizadora de voltaje en el sistema eléctrico, ya que mediante la misma se suavizan o reducen temporalmente las altas tensiones que pueden ocurrir en dichos sistemas, comunes en los procesos de encendido y apagado de los equipos de consumo. Los SFV generan una potencia eléctrica relativamente pequeña para la cual la baterías de acumuladores (figura 2.7) electroquímicos constituyen el medio de acumulación más apropiado.



**Figura 2.7- Batería para uso fotovoltaico**

La acumulación electroquímica es una vía de almacenar energía en forma química lo que implica emplear un sistema formado por uno o varios compuestos químicos que absorban o desprendan energía cuando reaccionen para formar otros compuestos, bajo la acción de la corriente eléctrica o den como resultado una fuerza electromotriz. Los acumuladores están constituidos por materiales activos cuyas características químicas les permiten acumular y suministrar electricidad, según se requiera. Un conjunto de materiales activos en presencia de un electrolito constituye el elemento básico de todo acumulador, conocido como celda electroquímica.

La cantidad de electricidad que una celda puede almacenar, y el voltaje que pueda producir en operación, son relativamente pequeños y están limitados entre otros

factores por el tipo y la cantidad de materiales activos utilizados, la cantidad y la naturaleza del electrolito empleado y las características constructivas de la propia celda.

Por lo tanto, para la mayoría de las aplicaciones prácticas, se hace necesario interconectar, en arreglos series y/o paralelos, varias celdas individuales para formar la batería de acumuladores y obtener la capacidad de almacenamiento y voltaje deseados.

Las celdas pueden agruparse en dos grandes grupos: **primarios y secundarios**. Dadas las características de los materiales activos empleados en su construcción, las baterías primarias únicamente pueden proporcionar electricidad llegando al final de su vida útil al quedar descargado por completo, debido al agotamiento del material poco activo. A este grupo pertenecen las pilas comúnmente usadas para la operación de lamparazas de mano, radios, etc.

Por el contrario, las celdas secundarias pueden ser recargadas repentinamente, sirviendo así como almacenes de electricidad, ya que el proceso electroquímico en su interior es reversible y constituyen propiamente los acumuladores que aquí tratamos. La vida útil está caracterizada por un determinado número de ciclos carga/descarga. A este grupo pertenecen las celdas utilizadas en las baterías de automóvil, industriales y otras.

### **Clasificación de las Baterías de Pb-ácido**

Las baterías de acumulación electroquímica, conocidas corrientemente como acumuladores (figura 2.8), pueden clasificarse atendiendo a diferentes aspectos. La clasificación más general de las baterías de Pb-ácido las divide en tres grupos fundamentales dependiendo de la función a que realizan: arranque, tracción y estacionarias. Dicha función obliga a diferenciar el diseño y fabricación de las mismas, aunque en principio de funcionamiento es el mismo.



**Figura 2.8- Banco de baterías**

**Baterías de Arranque.-** Utilizadas en automóviles y camiones, son sometidas a descargas con altas intensidades de corriente en tiempos muy cortos. Se constituyen de muchas placas (planas) o separadores delgados conectados en paralelos y con un electrolito de alta densidad. Normalmente descargan solamente un solo porcentaje de su capacidad. Presentan una vida muy limitada para descargas profundas. Se les conoce también como baterías SLI por las siglas en inglés de arranque, iluminación e ignición.

**Baterías de Tracción.-** Se aplican a vehículos eléctricos (montacargas, locomotoras de minas, alumbrado de ferrocarriles, barcos, etc.) y exigen un funcionamiento en ciclo de carga y descarga.

Muchas veces son sometidas a descargas muy profundas y recargas en un corto periodo de tiempo, como por ejemplo una jornada de ocho horas, por eso son diseñadas con placas tubulares, que impiden que durante la descarga haya desprendimiento de la materia activa, y con rejilla de bajo contenido de antimonio. Presentan alto consumo de agua, que hace necesario un constante mantenimiento.

**Baterías Estacionarias.-** Están diseñadas para sistemas de alimentación ininterrumpida, como centrales telefónicas, alumbrado de emergencia de hospitales y señalización, entre otros. Permanecen largos periodos trabajando en flotación, o sea, muy cargadas, pero resisten elevados regímenes de trabajo. Para operar en estas condiciones son diseñadas con placas y separadores gruesos y bajo o nulo contenido de antimonio. Presentan moderada resistencia al ciclado y bajo consumo de agua.

Por otra parte, **las baterías utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas** tienen unas prestaciones un poco distintas que las convencionales. La corriente de carga varía con el ciclo de radiación diaria y anual, las descargas son a baja intensidad lo que supone que cederían su capacidad total en períodos muy largos (más de cien horas), pueden permanecer períodos prolongados en estado parcial de carga, están sometidos a un ciclado diario de carga y descarga. Además deben presentar mínimo mantenimiento, principalmente en aplicaciones remotas de difícil acceso.

### 2.2.3 Regulador de Carga

Un Regulador de Carga de Batería (figura 2.9) puede definirse como el dispositivo de carácter electrónico o electromecánico que tiene como función optimizar los procesos de carga y descarga que ocurren en las baterías con el objetivo de maximizar el tiempo de vida útil de las mismas.



**Figura 2. 9- Regulador de carga**

En el caso de las baterías de Pb-ácido y alcalinas de Ni-Cd, el estado de carga esta relacionado directamente con el voltaje de salida, por lo que este proporciona una buena indicación del régimen en que esta trabando aquella. La a sobrecarga corresponde a un voltaje excesivamente alto, por lo que para evitarlo se puede introducir un elemento electrónico que disipe el exceso de potencia generado por el panel, o que desconecte la batería del mismo.

Lo más común para implementar la primera solución es colocar un transistor en paralelo con el panel, cuyo control determina que éste conduzca o no, según el voltaje de la batería sea superior o inferior a un cierto valor, fijado para cada tipo de batería y la temperatura de operación. Los RCB de este tipo se conocen como **reguladores paralelo** Y se emplean generalmente SFV de pequeña potencia menores de 100 W cuya disipación no plantea grandes dificultades.

La estrategia de control de un RCB determina la efectividad tanto de la carga de la batería como de la utilización del panel fotovoltaico y en conjunto determina la habilidad o la capacidad del SFV integralmente para satisfacer las demandas de los consumidores. Algunas características adicionales, tales como compensación de temperaturas, alarmas y algoritmos especial, pueden incrementar la eficacia del RCB para mantener la máxima capacidad de la batería y extender su tiempo de vida.

#### 2.2.4 Convertidores CDA

El convertidor corriente directa-corriente alterna (CDA) o inversor forma parte del subsistema de regulación y control de los Sistemas Fotovoltaicos (figura 2.10), aunque no presente siempre en los autónomos. La necesidad del inversor está determinada por el hecho de que el panel fotovoltaico suministra energía eléctrica en forma de CD y de esta misma forma, en caso necesario, es almacenada en el acumulador, mientras que los equipos consumidores pueden requerir CA para su funcionamiento.



### Figura 2. 10- Convertidores CDA

El tipo de inversor en los SFV es el llamado inversor autónomo, que no está conectado a la red, sino que atiende sólo a su propio conjunto de consumidores y funciona automáticamente con una frecuencia determinada internamente por el equipo.

Un importante requisito que imponen los SFV a los inversores lo constituye la eficiencia de operación, la cuál, debe ser lo más elevada posible.

Además deben cumplir con una serie de requisitos específicos como por ejemplo, ellos deben ser protegidos eficientemente contra cortocircuitos severos en su salida, así como poseer cierta capacidad de sobrecarga y admitir picos elevados de corriente para garantizar el arranque de motores en caso de que sean conectados.

Básicamente un inversor puede representarse esquemáticamente por el diagrama de bloques representado (figura 2.11).

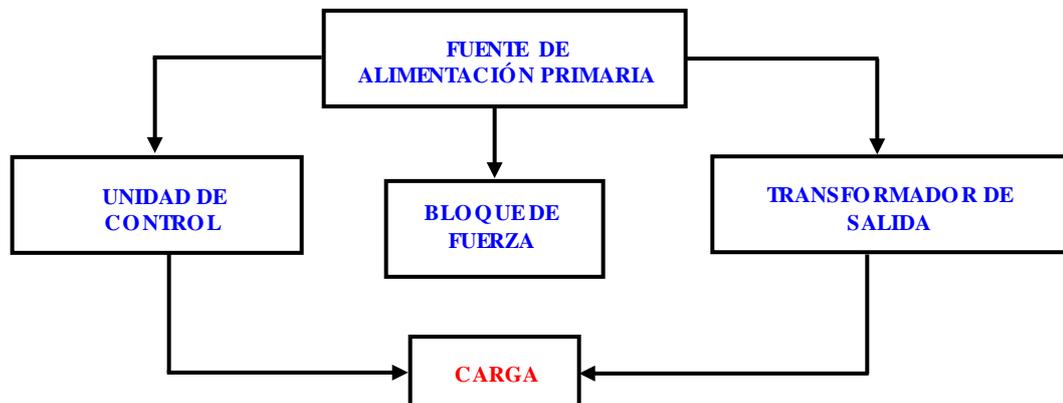


Figura 2.11- Diagrama de bloques de la alimentación a la carga

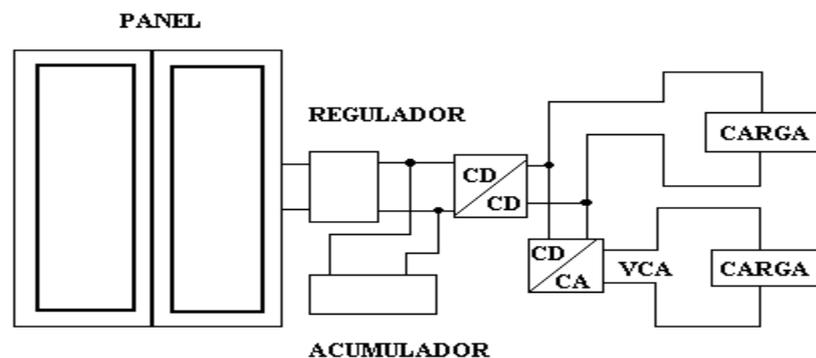
Como se aprecia en la figura, la unidad de control es la encargada de suministrar las señales correspondientes al bloque de fuerza, que realiza las sucesivas conmutaciones de una señal de CD en el primario del transformador de salida.

A pesar de que la carga no constituye una de las partes componentes de los inversores, se representa para ilustrar la forma en la cual la misma impone ciertas condiciones al diseño, cerrando de esta forma un lazo de regulación.

Dentro del bloque de fuerza, se ubican los interruptores estáticos, los cuales reciben el tipo de modulación designado por el fabricante. Los interruptores más usados en el pasado fueron los transistores bipolares, para potencias bajas y medias y los tiristores para potencias más elevadas. Los transistores soportan mal las sobrecorrientes y los tiristores tienen elevadas pérdidas de conmutación que afectan la eficiencia de los inversores.

No obstante que los inversores modernos poseen una alta eficiencia y fiabilidad, siguen siendo el equipo más discutido en los SFV debido a su alto costo, requerimientos de mantenimiento y reparación muy especializados y son muy susceptibles a operación inadecuada de manera que en la actualidad, muchos diseñadores de SFV evitan su utilización siempre que sea posible.

Ejemplo: Electrificación de una casa rural donde existen cargas de CD y de CDA (figura 2.12).



**Figura 2.12- Electrificación con paneles fotovoltaicos**

### 2.3.0 Seguidores Solares

Un seguidor es una estructura que puede seguir el sol girando sobre dos ejes, Este-Oeste y Norte-Sur, o sobre un eje inclinado. Los seguidores de dos ejes son los que

permiten seguir el Sol con mayor precisión. El aumento de rendimiento que da esta estructura es de un 34 % más con respecto a paneles fijos con inclinación óptima. En el caso de instalaciones fotovoltaicas, si consideramos el rendimiento de toda la instalación, es decir, paneles solares más inversores eléctricos, el incremento puede llegar al 40 %.

En un solo eje (Norte-Sur) el rendimiento anual puede incrementarse en un 30 %. Si consideramos que hay seguidores de dos ejes por unos 150 euros/metro cuadrado de paneles solares, éstos se amortizan rápidamente por la mayor producción de electricidad y, por tanto, se amortiza antes la instalación.

Para instalaciones solares térmicas para agua caliente sanitaria doméstica no son habituales los seguidores. El mantenimiento de un seguidor motorizado se evalúa en un coste anual de unos 120 euros. Lamentablemente, la mayoría de las instalaciones solares se hacen fijas. Quizás deberíamos valorar con más firmeza diseñar las instalaciones solares con seguimiento, dado que, hoy por hoy, la Tierra se mueve alrededor del Sol y seguirlo supone aumentar el rendimiento energético que nos ofrece. En las figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18, podemos apreciar algunos tipos de seguidores solares que se pueden utilizar en una estación fotovoltaica.

### 2.3.1 Tipos de Seguidores Solares

A continuación mostramos algunas vistas de seguidores solares:



**Figura 2.13- Seguidores de dos ejes en Tandem**



**Figura 2.14- Seguidor y concentrador combinados**





**Figura 2.15- Seguidores individuales**



**Figura 2.16- Seguidores sobre carril**



**Figura 2.17- Seguidor monoposte de dos ejes para instalaciones de 5 kW**



**Figura 2.18- Seguidor monoposte con accionamiento hidráulico**

### 2.3.2 Hidroseguidores Solares

Los Hidroseguidores, son amplificadores hidráulicos programados accionados por la energía de la gravedad durante la descarga y carga libre de agua; están formados

por dos recipientes: uno, trabaja por descarga libre de agua y acciona un extremo de un espejo cilíndrico-parabólico; y el otro, ubicado a menor altura, recibe por gravedad el agua del primer recipiente y acciona el otro extremo del espejo con movimiento sincrónico del espejo con el sol. Es posible, que cada recipiente maneje un espejo cilíndrico-parabólico.

El Hidroseguidor Solar acciona espejos cilíndrico parabólicos solo con la orientación ecuatorial simple y enfoque parcial del espejo, en virtud de la propiedad única del espejo cilíndrico parabólico de que todo rayo luminoso incidiendo sobre la superficie especular paralelo al plano determinado por la línea de los vértices y la línea focal del espejo, se refleje cortando la línea focal (en la caldera del espejo) donde se encuentran los fotocaptadores térmicos o eléctricos.

Más adelante en el Capítulo III de este trabajo “PROYECTO DEL HIDROSEGUIMIENTO” detallaremos sus principales componentes así como su funcionamiento.

#### **2.4.0 Componentes del Sistema de Control de Posición del Espejo con Hidroseguidores**

La referencia del sistema de control de posición del espejo cilíndrico-parabólico es la velocidad constante  $W_r = 15 \text{ }^\circ/\text{h}$  de rotación de la Tierra alrededor de su eje imaginario; sin embargo, en los detectores de error mostramos para mayor claridad una referencia circuital eléctrica. Desarrollamos la exposición desde un detector de error lineal muy explicativo hasta un detector de error circular más pertinente.

##### **a). Detector de Error Lineal**

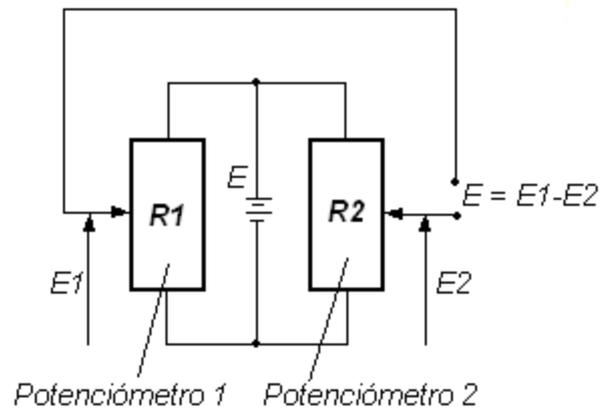


Figura 2.19- Diagrama del Detector de Error Lineal

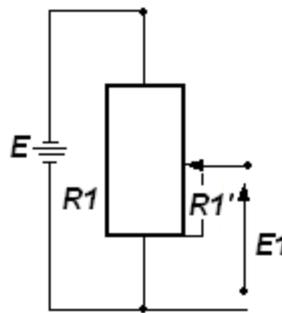


Figura 2.20- Potenciómetro 1

$$E_2 = \frac{R_1'}{R_1} E \tag{2-1}$$

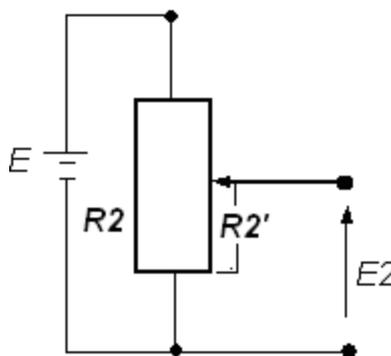
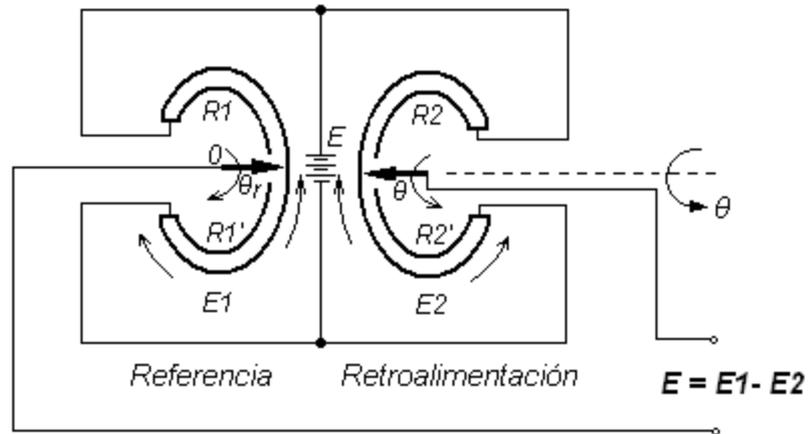


Figura 2.21- Potenciómetro 2

$$E_1 = \frac{R_2'}{R_2} E \tag{2-2}$$

**b). Detector de Error Circular**

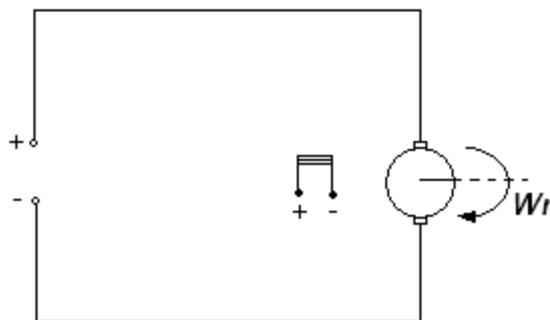


**Figura 2.22- Detector de Error Circular**

El valor de  $\theta_r$  está dado por la ec. (2-3).

$$\omega_r = \frac{1}{12} \pi = cte. \Rightarrow \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \theta_r = \omega_r t$$

$$\theta_r = \frac{1}{12} \pi t \tag{2-3}$$



**Figura 2.23 - Posible forma de generar el ángulo de referencia  $\theta_r$ .**

**c). Conexión del Detector de Error al Controlador**

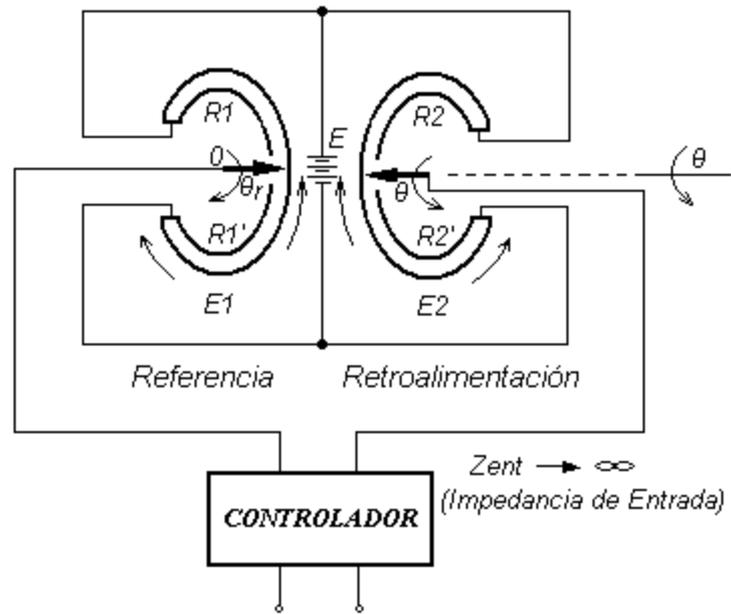


Figura 2.24- Conexión del Detector de Error al Controlador

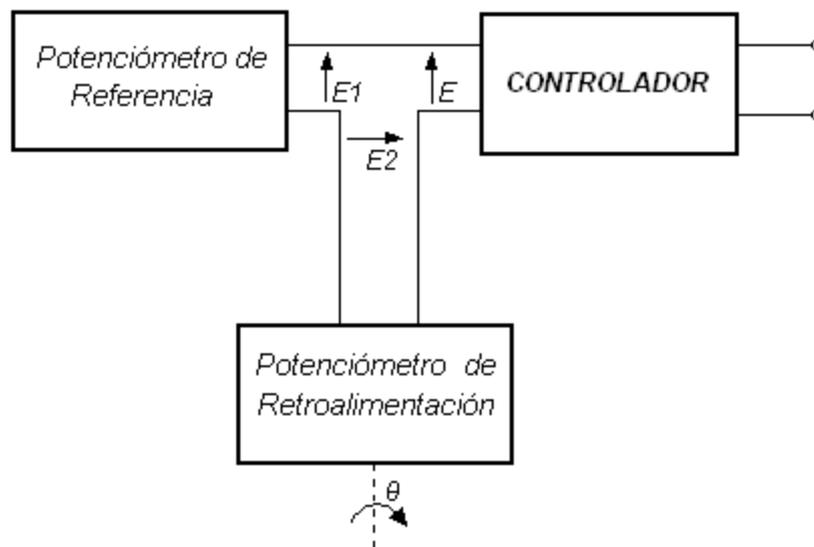


Figura 2.25- Esquema en bloques del Detector de Error al Controlador

d). Conversión del ángulo  $\theta_r$  a resistencia R

**Definición de Radián.-** Consideremos una circunferencia como centro en el vértice del ángulo y el arco que interceptan los lados del ángulo. Si el arco mide lo mismo que el radio de la circunferencia entonces decimos que el ángulo es de un radián.

$$\theta = \frac{l}{r} \text{ en radianes}$$

donde:

$l$ - es la longitud del arco

$r$ - radio del arco

### Ecuación de Ohm y Poillet para la Resistencia Eléctrica:

La resistencia de un conductor (figura 2.26) depende del material del mismo y de sus dimensiones y forma. Para un trozo de conductor de sección  $s$  constante y de longitud  $l$ , la resistencia es

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-4)$$

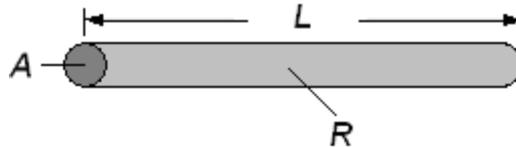


Figura 2.26- Conductor eléctrico

donde:

$\rho$  - es la resistividad eléctrica.

$A$  - es el área de la sección transversal

$R$  - es la resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica  $R$  en función del ángulo  $\theta$  en radianes.

$$R = \left[ \rho \frac{r}{A} \right] \theta$$

$\rho$  es una magnitud que depende solamente del material del conductor y se llama resistividad o resistencia específica del material. Por lo tanto la resistencia de un trozo de conductor es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de la sección  $s$ .

e). Conexión en paralelo de los motores de CD al Controlador

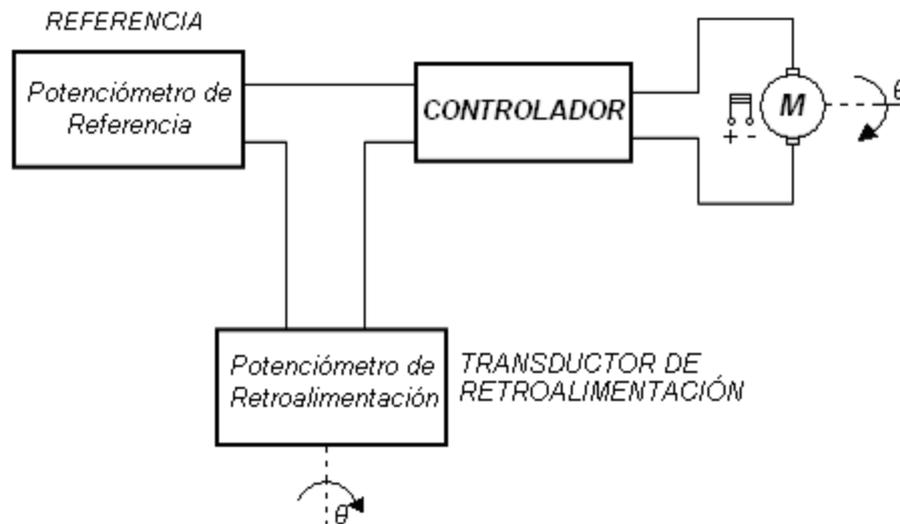


Figura 2.27- Conexión del Detector de Error al Motor de CD a través del Controlador

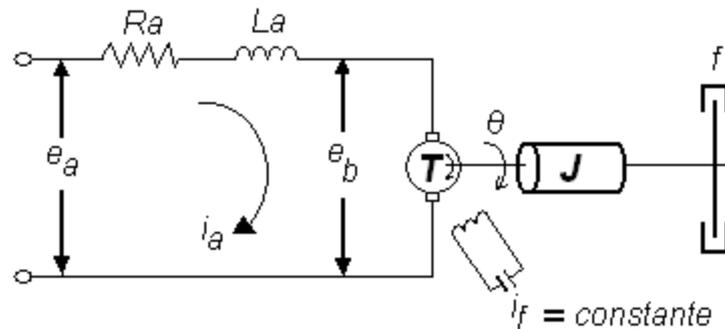
f) Motor de CD

Teniendo como referencia Ogata en 1987, frecuentemente se emplean motores de corriente directa (figura 2.28) en un sistema de control en que se necesita una apreciable cantidad de potencia en el eje, por ser más eficientes que los servomotores ca de dos fases.



Figura 2.28- Motor de Corriente Directa

Los motores de CD tienen campos separadamente excitados; son bien controlados en el inducido con campo fijo o de campo controlado con corriente de inducido fijo (como indica la figura 2.29). Asumiendo esto podemos decir que el par  $T$  desarrollado por el motor es proporcional al producto de la corriente de inducido  $i_a$  y el flujo  $\psi$  del entre hierro que a su vez proporcional a la corriente del campo donde  $K_f$  es una constante.



**Figura 2.29- Motor de CD controlado por el inducido**

Por tanto se puede escribir el par  $T$ .

$$T = K_f i_f K_1 i_a$$

donde:

$K_1$  - es una constante.

$i_f$  - es la corriente de campo en amperios.

$i_a$  - es la corriente del devanado del inducido en amperios.

Para una corriente de campo constante el flujo se vuelve constante y el par se hace directamente proporcional a la corriente del inducido.

$$T = K i_a$$

donde:

$K$  - es una constante del par motor.

Para un flujo constante, la tensión inducida  $e_b$  (Ec.2-5) es directamente proporcional a la velocidad angular  $\frac{d\theta}{dt}$ . Así,

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (2-5)$$

donde:

$K_b$  - es una fuerza contraelectromotriz.

La velocidad de un motor de cd es controlado en el inducido por medio de la tensión del inducido  $e_a$ . La tensión de inducido  $e_a$  es suministrada por un generador a su vez alimentado por un amplificador.

La ecuación diferencial del circuito de inducido es:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a \quad (2-6)$$

donde:

$L_a$ - es la inductancia del devanado del inducido en henrios.

$R_a$ - es la resistencia del devanado en ohmios.

Es así que la corriente del inducido produce el par que se aplica a la inercia y fricción; por tanto.

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = T = K i_a \quad (2-7)$$

donde:

$J$ - es el momento de inercia equivalente del motor

$\theta$ - es el desplazamiento angular del eje del motor en radianes

Tomando las transformadas de Laplace de las Ecs. (2-5), (2-6) y (2-7) anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$K_b s\Theta(s) = E_b(s) \quad (2-8)$$

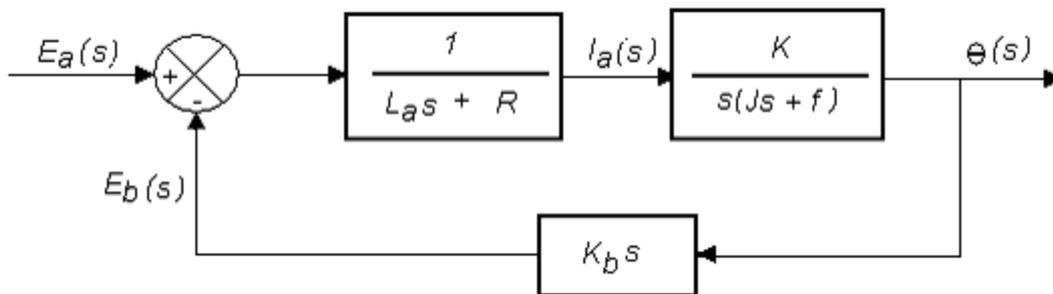
$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (2-9)$$

$$(Js^2 + fs)\Theta(s) = T(s) = KI_a(s) \quad (2-10)$$

donde:

$E_a(s)$ - es la entrada

$\Theta(s)$ - es la salida, como indica la Figura 2.30



**Figura 2.30- Diagrama de bloques de un motor CD.**

Como puede verse en la figura (2.30) se ve el efecto de la fuerza contraelectromotriz en la señal de realimentación proporcional, aumentando el amortiguamiento efectivo del sistema, obteniendo la función de transferencia de este sistema.

$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s [L_a Js^2 + (L_a f + R_a J) s + R_a f + KK_b]}$$

Si se desprecia  $L_a$  la función de transferencia esta dada por la Ec. (2-11) se reduce a.

$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (2-11)$$

Donde se obtiene finalmente el modelo matemático de la constante de ganancia del motor y la constante de tiempo del motor.

$$K_m = \frac{K}{(R_a f + K K_b)}$$

$$T_m = \frac{R_a J}{(R_a f + K K_b)}$$

### g) Hidroseguidor que Trabaja por Descarga

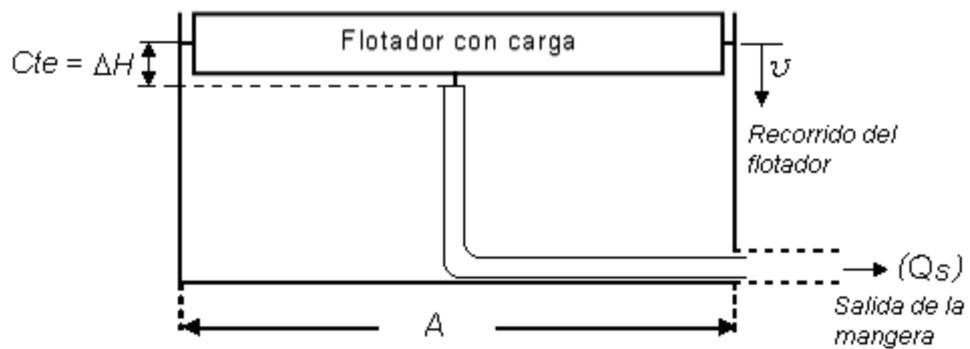


Figura 2.31- Hidroseguidor de peso constante

El hidroseguidor que trabaja por descarga está determinado por Ec. 2-12:

$$Q_s = C d S \sqrt{2 g \Delta H} \quad (2-12)$$

donde:

$\Delta H$  - es la variación de la altura hidráulica ( $Cte$ )

$Q_s$  - es el gasto volumétrico de salida ( $Cte$ )

$$Q_s = A v \Rightarrow v = \frac{Q_s}{A} = cte.$$

Tomando la transformada de Laplace se tiene.

$$Q_s(s) = K \theta_m(s) \quad (2-13)$$

La figura 2.35 muestra el nexo entre  $\theta_m(s)$  y  $Q_s(s)$ .

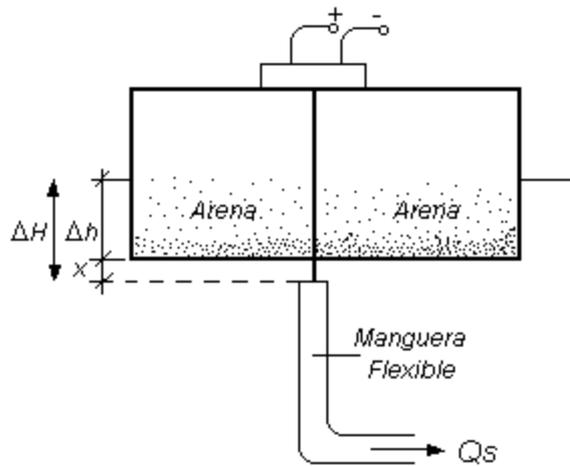


Figura 2.32- Flotador de peso constante

$$Q_s = K_2 X ; \quad X \text{ es el desplazamiento de la manguera}$$

$$Q_s = K_2 \cdot \frac{1P}{2\pi} \cdot \theta_m$$

Suponiendo que sea  $x$  el desplazamiento de la manguera durante el proceso de descarga del agua y  $P$  sea el paso del tornillo sin fin se tiene la siguiente gráfica.

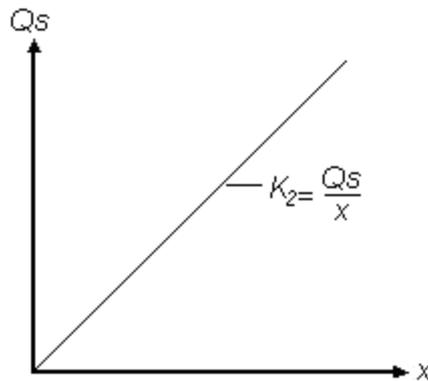


Figura 2.33- Relación lineal entre X y Qs

$$\begin{array}{l} 2\pi \text{ — } 1P \\ \theta_m \text{ — } X \end{array}$$

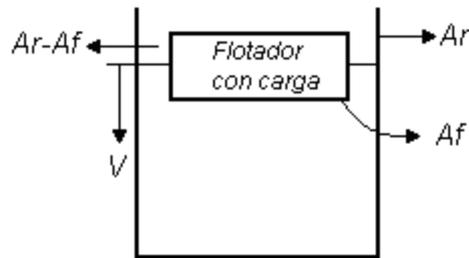
$$x = \frac{1P}{2\pi} \cdot \theta_m \tag{2-14}$$

Ecuación Linealizada del Gasto:

$$Q_s = \frac{2}{Rt} \Delta H$$

$$Q_s = \left( \frac{2}{Rt} \right) [\Delta h + x]$$

$$Q_s = \left( \frac{2}{Rt} \right) \left[ \Delta h + \frac{1P}{2\pi} \cdot \theta_m \right]$$



**Figura 2.34 Descenso a velocidad constante V del flotador con carga**

donde:

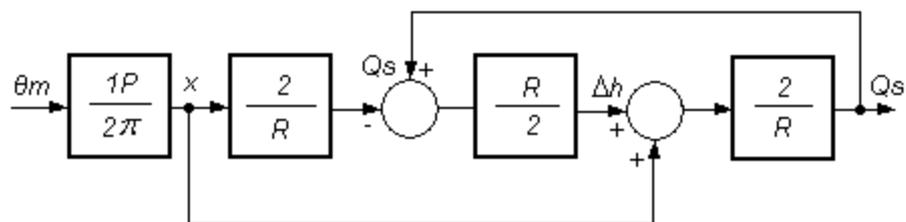
V- es la velocidad constante de descenso del flotador.

Ar- es el área interna del recipiente.

Af- es el área externa del flotador.

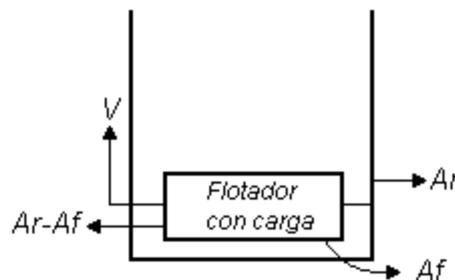
$$V = \frac{Q_s}{Ar - Af}$$

**Diagrama de Bloques del Flotador de Peso Constante**



**Figura 2.35- Flotador de peso constante****h) Hidroseguidor que Trabaja por Carga**

El Hidroseguidor que trabaja por carga libre de agua recibe por gravedad el agua que viene del Hidroseguidor que trabaja por descarga libre y acciona sincrónicamente al espejo cilíndrico-parabólico durante el ascenso a velocidad constante  $V = W_r \ r = Cte$  de su flotador con carga. El movimiento del flotador con carga se muestra en la figura 2.36.

**Figura 2.36-Ascenso a velocidad constante V del flotador con carga**

$$V = \frac{Q_s}{A_r - A_f}$$

**i) Sistema de Transmisión Mecánica**

El sistema de transmisión mecánica del movimiento del espejo cilíndrico-parabólico está dado por dos poleas grandes que serán utilizadas en el módulo de hidroseguidor más el apoyo de 4 poleas pequeñas dispuestas para este caso.

$$v = \omega_r \ r = cte.$$

$$\omega_r = \frac{d \theta_r}{dt}$$

$$\frac{d \theta_r}{d t} = \frac{V}{r} \quad (2-15)$$

donde:

$V$ - es la velocidad constante del movimiento de los flotadores.

$\omega_r$  - es la rotación de la tierra 15 °/h.

$r$ - es el radio de la polea grande.

$\theta_r$  - es el ángulo de rotación del espejo.

$$\theta_r = \frac{V}{r} t \quad (2-16)$$

### 2.5.0 Introducción a la Modelación Matemática

Al desarrollar modelos matemáticos de sistemas de control como en nuestro caso, se encuentra que las ecuaciones diferenciales involucradas pueden hacerse bastante complicadas debido a la multiplicidad de entradas y de salidas. En realidad, la cantidad de entradas y salidas por ejemplo de un sistema complejo puede llegar a los centenares. Para simplificar las expresiones de los sistemas de ecuaciones, es ventajoso utilizar la notación vectorial-matricial. La simplicidad de notación lograda indicando operaciones en vectores y matrices es muy conveniente para el trabajo teórico, y en realidad, resulta esencial en el análisis y síntesis de sistemas de control moderno.

Recurriendo a la notación de vectores y matrices se pueden manipular problemas grandes y complejos con facilidad, siguiendo la forma de sistematización de representación del sistema de ecuaciones y resolviendo sus cálculos en computadora.

Según Seborg, D. E. en 1989, el modelo no es más que una abstracción matemática del proceso real, donde la ecuación o conjunto de ecuaciones que componen el mismo es la mejor aproximación del proceso.

En el presente capítulo se realiza la modelación matemática del Seguimiento de un Espejo Cilíndrico Parabólico Accionado durante la descarga y carga libre del agua.

Los modelos matemáticos pueden ser utilizados en el control y análisis del proceso de la siguiente manera:

- proyecto de estrategia de control para un nuevo proceso.

- seleccionar los parámetros de ajuste de un controlador.
- diseño de lazos de control.
- optimización de las condiciones de operación del proceso.

Los modelos pueden ser considerados en tres diferentes clasificaciones:

- i) modelos teóricos desarrollados a partir de los principios de la Química y de la Física.
- ii) modelos empíricos, obtenidos a partir del análisis matemático (estadístico) del proceso.
- iii) modelos semi empíricos los cuales representan un compromiso entre (i) y (ii) con uno o más parámetros para ser validado.

En el Capítulo IV se precisarán cada uno de los modelos de los principales componentes de los que está conformado nuestro proyecto de hidroseguimiento solar, esto permitirá diseñar un programa de simulación que de respuesta a la toma de decisiones operacionales.

La primera cuestión necesaria para la automatización de un sistema es la conformación de las ecuaciones dinámicas que interrelacionan las variables de entrada (manipuladas o de control) y de salida (controladas) del mismo.

El Simulink, herramienta del MATLAB desarrollado por la Mathworks. Inc. en su última versión en, presenta distintas herramientas que posibilitan, usando diferentes métodos de integración numérica, poder obtener solución para un conjunto de ecuaciones diferenciales con bastante rapidez y exactitud, superando en muchos casos los anteriormente existentes.

Los largos tiempos de simulación representaron una desventaja hasta hace dos o tres años, hoy potentes computadoras, con potentes y modernos microprocesadores en pocos minutos ofrecen con un mínimo de error la solución deseada.

## 2.6.0 Controladores

Los controladores son dispositivos que cumplen la función, en el circuito a lazo cerrado, de elaborar una señal de control que actúa sobre el elemento final de manera tal que la desviación existente entre el valor de la variable controlada y el deseado o prescrito se reduzca a cero o a un valor pequeño. Es decir el controlador produce una acción o señal de control que conduce a una disminución de la desviación.

La acción que se opone al efecto producido por la perturbación en la variable controlada se expresa matemáticamente como la relación entre la señal de salida del controlador y la desviación, y se conoce como acción o modo de control.

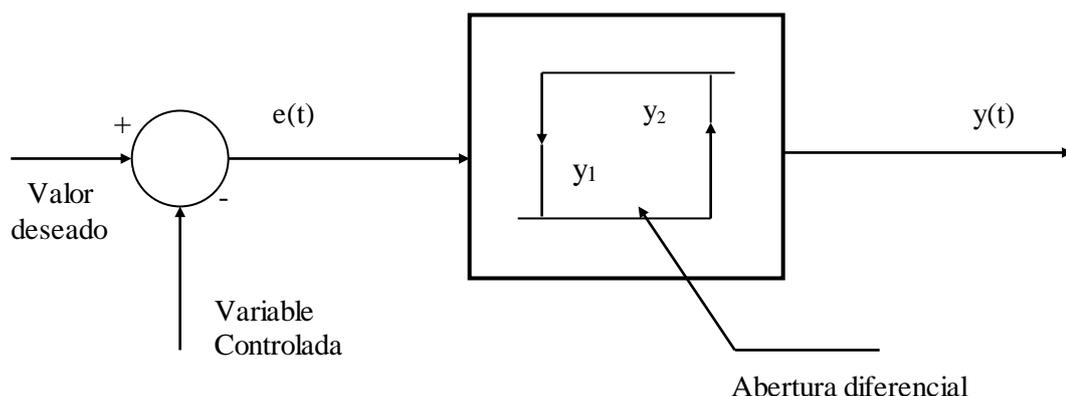
### 2.6.1 Tipos de Controladores

A continuación se muestran los diferentes tipos de Controladores

#### a). Controlador de dos Posiciones

Es el controlador en el que la señal de salida es discontinua y la señal de entrada es continua. La discontinuidad de la señal de salida viene dada por dos valores fijos, los cuales hacen que el elemento final de control adquiera sólo dos estados: conectado o desconectado, abierto o cerrado.

Estos dos estados generalmente se alcanzan rápidamente, y dependen de que la desviación o error llegue a uno de los valores extremos de la llamada *abertura diferencial*. Se denomina apertura diferencial al rango a través del cual la señal del error puede variar antes de que ocurra el cambio de posición en la señal de salida.



$$y(t) = y_2 \text{ para } e(t) \geq 0$$

$$y(t) = y_1 \text{ para } e(t) \leq 0$$

**Figura 2.37- Diagrama de bloques de un controlador de dos posiciones con abertura diferencial**

La acción de control de dos posiciones origina oscilaciones de la variable controlada, lo que en muchos casos no es conveniente en el control industrial. El controlador de dos posiciones es relativamente simple y barato, por lo que es ampliamente en sistemas de control domésticos.

### **b). Controlador Proporcional (P)**

Es el controlador cuya acción de control es proporcional. Es decir, es el dispositivo en el que un cambio en la señal (figura 2.38) de entrada produce un cambio proporcional en la señal de salida.

Si se considera a  $y(t)$  la señal de salida en cualquier instante de tiempo, y a  $e(t)$  el valor del error o señal de entrada, la ecuación (2-17) en el dominio del tiempo, es decir la acción de control temporal, viene dada por la siguiente ecuación.

$$y'(t) = y(t) - y_0 = K_c e(t) \quad (2-17)$$

donde:

$K_c$ - es la ganancia o constante de acción proporcional del controlador;  $y_0$  la señal de salida a  $t = 0$ .

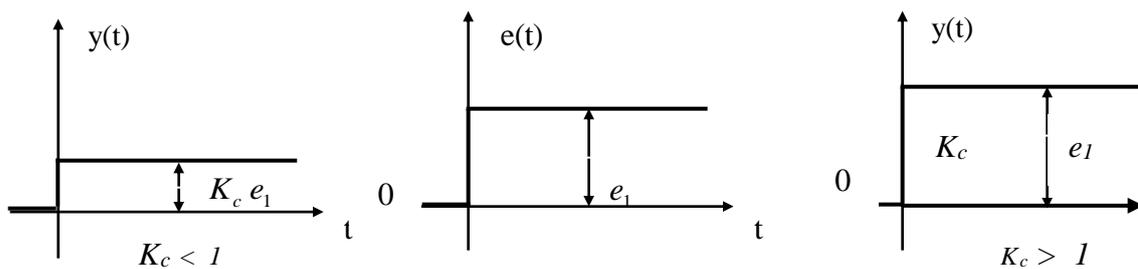
La función de transferencia (Ec.2-17) correspondiente al controlador proporcional se obtiene aplicando la transformada de Laplace a la ecuación anteriormente dada.

$$\frac{Y'(s)}{E(s)} = K_c$$

donde:

$$Y'(s) = L\{y(t) - y_o\}, E(s) = L\{e(t)\} \quad (2-18)$$

Si el error cambia súbitamente en una magnitud igual a  $e_1$  el cambio que se opera en la señal de salida es instantáneo y de magnitud igual al producto de la ganancia por  $e_1$ .



**Figura 2.38- Respuestas Temporales del controlador proporcional a cambios del tipo paso escalón en el error.**

### c). Controlador Integral (I)

Los controladores con este tipo de acción de control son poco frecuentes en el control de procesos. Sin embargo, son muy empleados en la industria de los controladores en los que la acción integral se encuentra asociada a otras acciones de control.

La acción de integral pura produce (Ec.2-19) en el controlador da una señal de salida cuya velocidad de cambio es proporcional al error, o sea:

$$\frac{dy(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2-19)$$

Integrando la (Ec.2-19) se obtiene la expresión matemática correspondiente a la acción integral (Ec.2-20):

$$y(t) - y_0 = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2-20)$$

Donde  $K_i$  es una constante ajustable, e igual al inverso del tiempo de integración  $T_i$ .

Mientras exista diferencia entre el valor deseado y el valor de la variable del proceso, la señal de salida continuará cambiando a una velocidad proporcional a esa diferencia.

La función de la acción integral es:

$$\frac{Y'(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

#### d). Controlador Proporcional Integral (PI)

Es un controlador en el cual la acción integral esta asociada a la acción proporcional. La Ec. (2-21) en el dominio del tiempo de esa asociación de acciones viene dada en la forma siguiente:

$$y'(t) = y(t) - y_0 = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2-21)$$

donde  $K_c$ , ganancia del controlador;  $T_i$  tiempo de integración del controlador.

Tanto  $K_c$  como  $T_i$  son parámetros ajustables. El tiempo de integración influye en la acción integral, y la ganancia en las acciones de control integral y proporcional.

El tiempo de integración es el tiempo que hubiera tardado la acción integral en alcanzar por sí sola el valor que se logra en la acción proporcional. La función de transferencia (Ec.2-22) correspondiente a este tipo de acción de control es.

$$\frac{Y'(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_c \left( \frac{1 + T_i s}{T_i s} \right) \quad (2-22)$$

En la figura (2.39) se muestra el diagrama de bloques del controlador con acción PI. Para una señal de entrada  $e(t)$  en forma de escalón unitario, la señal de salida,  $y(t) - y_0$  adquiere la forma dada.

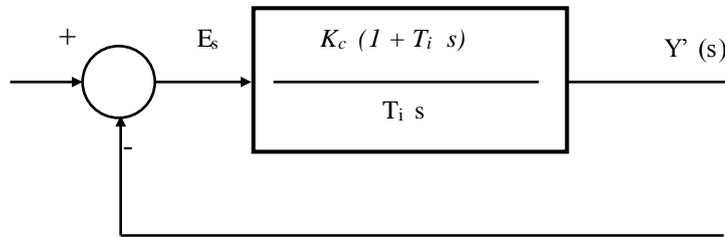


Figura 2.39- Diagrama de bloques del controlador con acción PI

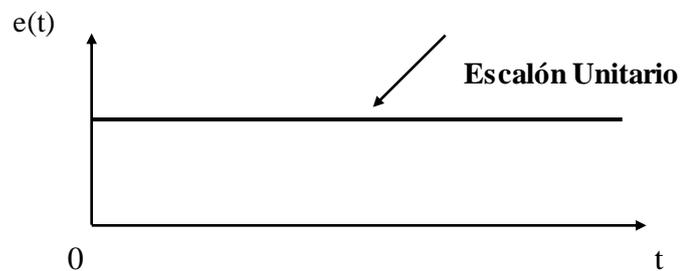


Figura 2.40- Diagrama de la función escalón unitario

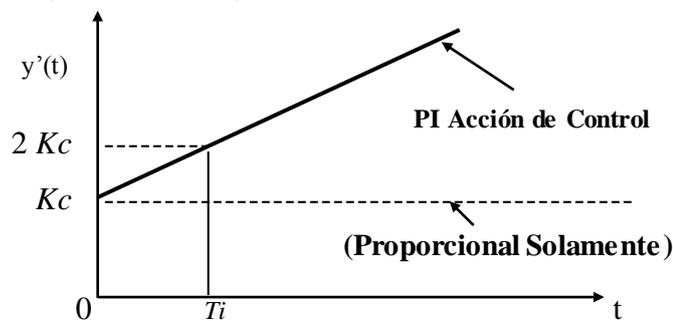


Figura 2.41- Diagrama de la señal de salida del controlador

**e). Controlador Proporcional Derivativo (PD)**

La acción de control en este tipo de controlador está definida con la siguiente expresión:

$$y'(t) = y(t) - y(0) = K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-23)$$

*Acción* *Acción*  
*Proporcional* *Derivativa*

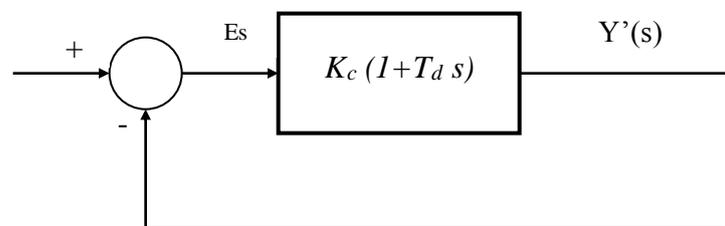
La acción derivativa en un controlador produce una señal de salida que es proporcional al cambio temporal en el error, por lo que su efecto es nulo cuando el error se mantiene constante.

El tiempo derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo en el que la acción derivativa se adelanta al efecto producido solamente por la acción proporcional; es por esto que a esta acción se le denomina también acción de adelanto.

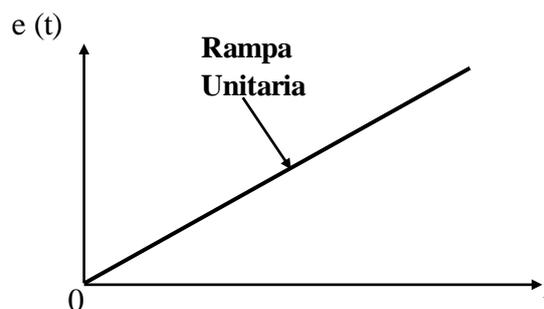
Debido a que la acción derivativa responde sólo a la velocidad de cambio del error (figura 2.42), es mejor estudiar la respuesta temporal de la señal de salida del controlador empleando señal de error del tipo rampa.

La función de transferencia de la acción PD es

$$\frac{Y'(s)}{E(s)} = K_c (1 + T_d s)$$



**Figura 2. 42- Diagrama de bloques del controlador con acción PD**



**Figura 2.43- Diagrama de la función rampa unitaria para el error**

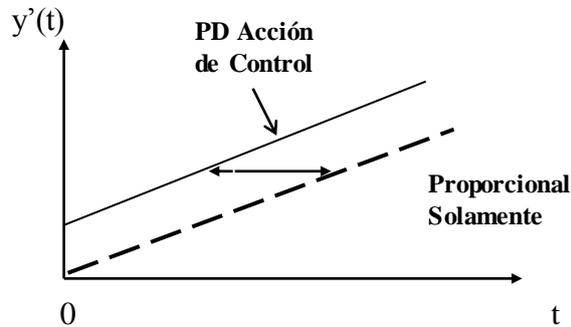


Figura 2.44- Señal de Salida del Controlador

**f). Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)**

La acción de control en este tipo de controlador (figura 2.45) es el resultado de la combinación de la acción proporcional, integral y derivativa (figura 2.46). Esta acción posee las características de cada una de las tres acciones (Ec.2-24), y queda definida mediante la siguiente ecuación.

$$y(t) - y(0) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-24)$$

La función de transferencia correspondiente es (Ec.2.25).

$$\frac{Y'(s)}{E(s)} = K_c \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2-25)$$

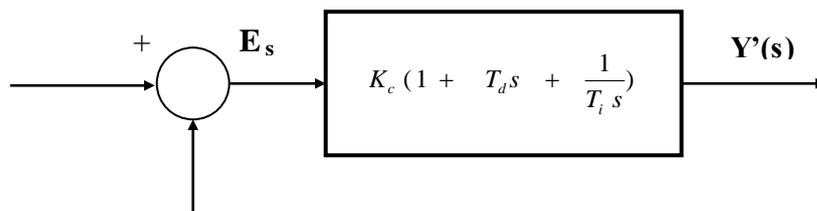
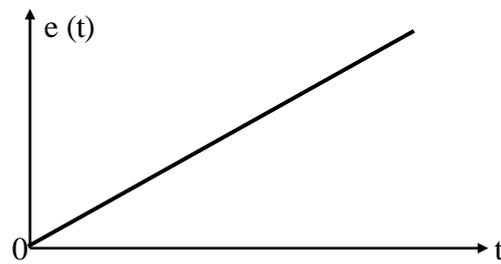
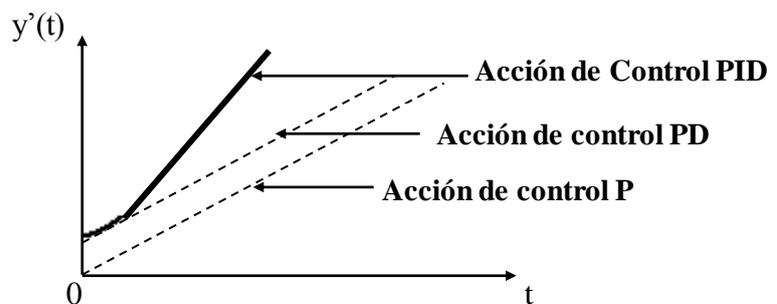


Figura 2.45- Diagrama de Bloques del Controlador



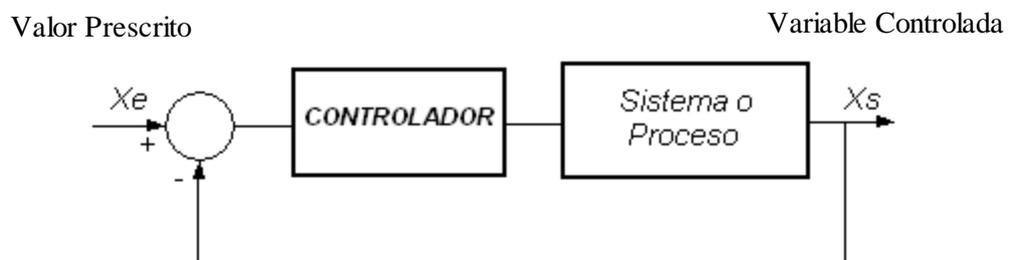
**Figura 2.46- Función Unitaria**



**Figura 2.47- Señal de Salida del Controlador**

### 2.7.0 Ajuste Óptimo de Controladores por el Método de las Oscilaciones Mantenido de Ziegler Nichols.

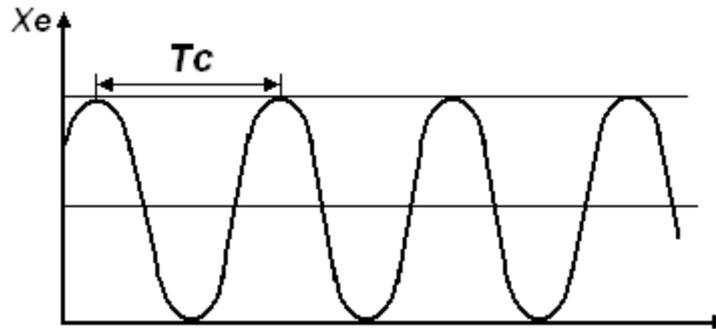
Este método fue desarrollado por Ziegler y Nichols. Mediante su aplicación se pueden calcular los valores de ajuste de las acciones de control a partir de pruebas simples con el sistema a lazo cerrado (figura 2.48) y sólo con la acción proporcional del controlador.



**Figura 2.48- Sistema a Lazo Cerrado**

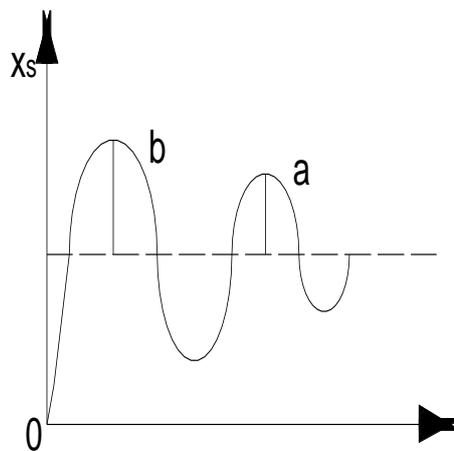
El procedimiento es como sigue:

1. Se deja el Controlador proporcional con bajísima ganancia (figura 2.49).



**Figura 2.49- Oscilaciones a la salida del sistema de control**

2. Se incrementa gradualmente la ganancia del controlador (Ec.2-10) hasta que se obtienen a la salida oscilaciones mantenida figura 2.50.



**Figura 2.50- Respuesta aproximada del sistema una vez ajustado**

$$\frac{a}{b} \cong \frac{1}{4} \quad (2-26)$$

3. En estas condiciones se determinan:  $T_c$ , periodo crítico de las oscilaciones de salida;  $K_c$ , ganancia crítica del controlador.

4. Se aplican los siguientes valores de ajuste de las acciones del controlador en función al tipo de controlador.

Los valores de ajuste óptimo de las acciones de control pueden ser diferentes para distintos tipos de procesos pero para nuestro sistema aplicaremos los siguientes valores.

Controlador P:  $K = 0,5 K_c$

Controlador PD:  $K = 0,6 K_c$ ;  $T_d = 0,12 T_c$

Controlador PI:  $K = 0,45 K_c$ ;  $T_i = 0,83 T_c$

Controlador PID:  $K = 0,6 K_c$ ;  $T_i = 0,5 T_c$ ;  $T_d = 0,12 T_c$

### 2.8.0 Error a Régimen Estacionario

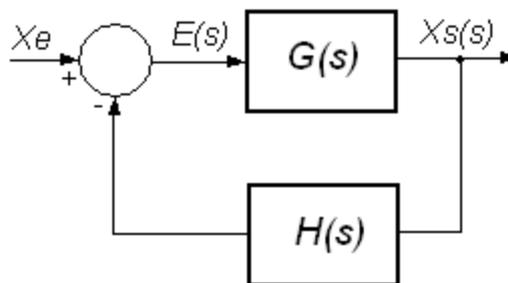


Figura 2.51- Régimen Estacionario

#### Demostración:

Supongamos que  $G(s)H(s)$  puede presentarse:

$$G(s)H(s) = K \frac{(T_a s + 1)(T_b s + 1) \dots}{s^v (T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots} \quad (2-27)$$

Donde;  $\nu = 0, 1, 2, 3, \dots$

El sistema es tipo cero si  $\nu = 0$ .

El sistema es tipo 1 si  $\nu = 1$ .

El sistema es tipo 2 si  $\nu = 2$ .

El sistema es tipo 3 si  $\nu = 3$ .

### 2.8.1 Respuestas del Sistema

Estudiaremos las respuestas del sistema a señales de entrada escalón y rampa

a) Escalón.

$$\omega_r = \text{Constante.}$$

b) Rampa.

$$\theta_r = \omega_r t.$$

El teorema del valor final de la Transformada de Laplace esta dada por la siguiente expresión.

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s)$$

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s) H(s)} X_e(s)$$

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s) H(s)} X_e(s)$$

- **Respuesta al Escalón de Entrada al Sistema**

$$X_e(s) = \frac{X_{e0}}{s}$$

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \cancel{s} \frac{1}{1 + G(s) H(s)} \cdot \frac{Xeo}{\cancel{s}}$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{Xeo}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s) H(s)}$$

*Coefficiente de error-posición:*

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) H(s) \quad (2-28)$$

$$\varepsilon = \frac{Xeo}{1 + K_p} \quad (2-29)$$

- **Respuesta de Entrada al Sistema**

$$Xe(s) = \frac{Xeo}{s^2}$$

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \cancel{s} \frac{1}{1 + G(s) H(s)} \cdot \frac{Xeo}{\cancel{s^2}}$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} s G(s) H(s)}$$

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s) H(s) \quad (2-30)$$

donde:

$K_v$  -es el coeficiente de error estático de velocidad.

$$\varepsilon(\infty) = \frac{Xe0}{K_v} \quad (2-31)$$

Las Ecs (2-28), (2-29), (2-30) y (2-31) serán usados en el capítulo IV.

### **2.9.0 Conclusiones**

En este capítulo se establecen los fundamentos cognoscitivos específicos en que se sustentan los desarrollos científico – técnicos del control automático del seguimiento del sol con espejos cilíndrico – parabólicos.

# CAPITULO III

## **CAPITULO III**

### **PROYECTO DEL HIDROSEGUIMIENTO**

#### **3.1.0 Instalación**

La instalación fotovoltaica consta de un módulo compuesto por una pareja de motores hidráulicos que mueven un espejo cilíndrico-parabólico, para mantener un movimiento sincrónico con el sol, y así aumentar la energía solar captada, y por ende la energía eléctrica que se genera. Esta energía eléctrica se almacena en los acumuladores, para luego ser transformada en corriente alterna, mediante el inversor, y llevada a los consumidores de este tipo de corriente.

El sincronismo entre el movimiento del Sol y el panel fotovoltaico en el arranque y / o funcionamiento de la estación fotovoltaica puede ser realizado con fotosensores los que utilizaremos en este panel cilíndrico parabólico o a su vez con un programa que calcule la posición del Sol en función de las coordenadas geográficas, latitud del lugar y día del año. En esencia, los sistemas de control de paneles fotovoltaicos, compensan en el panel el movimiento de rotación de la Tierra.

La energía generada por la estación fotovoltaica o módulo fotovoltaico puede ser usada directamente por el consumidor o en coordinación con una red eléctrica. En el primer caso se requieren sólo los lazos de control entre la planta generadora fotovoltaica y los usuarios; en el segundo caso se exigen además lazos que coordinen el trabajo de la estación fotovoltaica con la red eléctrica que requiere un proceso mas complejo.

#### **3.2.0 Esquema de un Módulo de Hidrosegimiento**

Un esquema de un módulo de hidrosegimiento se muestra (figura 3.1) a continuación.

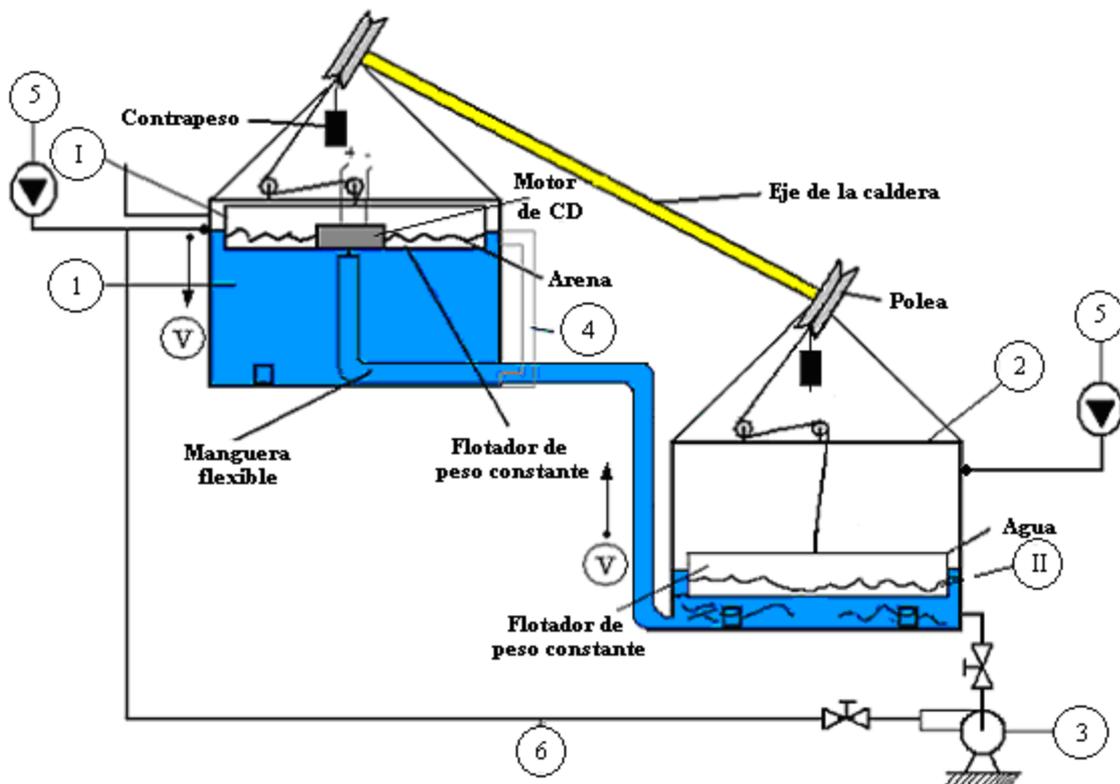


Figura 3.1- Esquema de principio de un módulo de hidroseguimiento

Leyenda:

- 1, Hidroseguidor que trabaja por descarga libre de agua durante el día.
- 2, Hidroseguidor que trabaja por carga libre de agua durante el día.
- 3, Bomba de recirculación del agua del tanque 2 al 1 para crear condiciones iniciales de seguimiento del próximo día.
- 4, Medidor de nivel visual para el llenado del tanque 1.
- 5, Sensores de nivel en el tanque 1 y 2
- 6, Tuberías y válvulas check o retención
- I y II Flotador de peso constante.
- V, Velocidad de desplazamiento constante de los flotadores.

### 3.2.1 Funcionamiento de un Módulo de Hidroseguimiento

A partir de las condiciones iniciales cuando los contrapesos están desconectados de los flotadores se abre la válvula entrada manualmente para el llenado del tanque 1

hasta que el flotador de peso constante este en un nivel máximo, entonces se procede a conectar los contrapesos en los extremos del espejo cilíndrico parabólico quedando así en condiciones iniciales de trabajo para comenzar a dar el seguimiento a sol cuando este empiece a salir.

Luego de haber salido el sol por el este, el panel cilíndrico parabólico está orientado de tal manera que los rayos solares incidan directamente sobre el, de esta forma las células fotovoltaicas ubicadas a los extremos del eje de la caldera reciben la señal captada por el sol, dando a su vez una señal a un servomotor que está acoplado en el flotador de peso constante que acciona un dispositivo para que abra o cierre una manguera por donde el líquido sale hacia el tanque 2 que está ubicado a una altura inferior del 1, y comienza a producirse el hidroseguimiento.

El agua que va del tanque 1 al 2, se almacena controladamente en el flotador de peso constante II para compensar las perturbaciones específicas que actúan sobre él. Un servomotor controla la entrada de agua al recipiente 2.

Al concluir el día de trabajo, el flotador II se encuentra en la posición más alta y cierra un contacto (sensor de nivel) que pone en funcionamiento la motobomba 3. Comienza el descenso del flotador II y el ascenso a igual velocidad del flotador I.

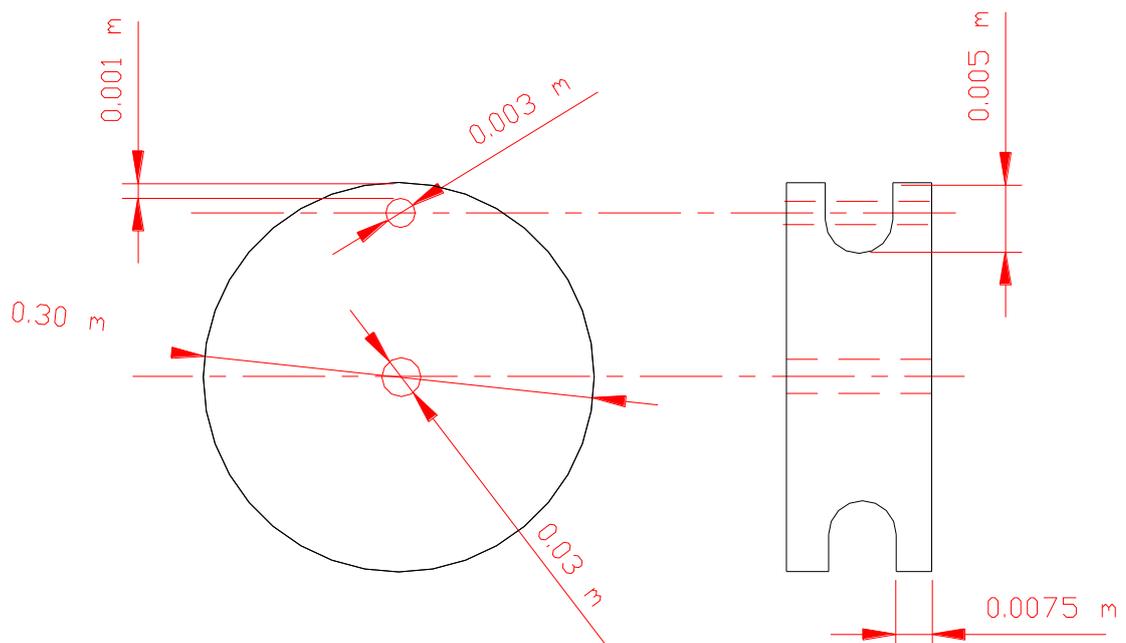
Al llegar el flotador I a la posición más alta, abre un contacto (sensor de nivel) y deja de funcionar la motobomba 3. De esta forma se crean las condiciones para el inicio del trabajo del próximo día.

### **3.2.2 Diseño de un Módulo de Hidroseguimiento**

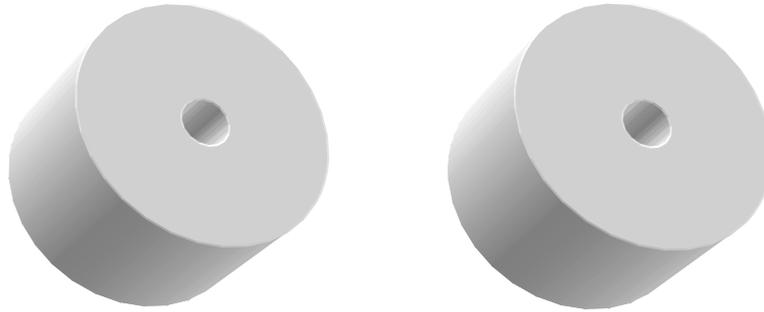
Para el diseño de un hidroseguidor se tuvo en cuenta la suposición de que el espejo está mecánicamente compensado, en equilibrio indiferente respecto al eje focal producto de los contrapesos.

### 3.2.3 Diseño de las Poleas y los Cables

Dos poleas de aluminio iguales, una a cada extremo del espejo cilíndrico parabólico, (figura 3.2) serán utilizadas en el módulo de hidroseguimiento también llevan dos prisioneros de 0,003 m de diámetro uno a cada lado de la polea para detener el cable a cierto recorrido. También se construirán 4 poleas de 0,05 m de diámetro, 0,02 m de ancho, con un canal de 0,005 m, el eje de la polea de 0,01m de diámetro, el modelo de polea es la misma que se muestra en la gráfica, pero solo cambian sus medidas.



**Figura 3.2-Esquema de las poleas grandes**



**Figura 3.3- Contrapesos grandes de 151 kgf cada uno**



**Figura 3.4- Contrapesos pequeños de 1 kgf cada uno**

También se utilizará cables de acero de 0,005 m de diámetro y una longitud efectiva de 1,41 m; en total serán dos cables de 2 m para facilitar la unión de sus extremos.

### **3.2.4 Diseño del Espejo Cilíndrico-Parabólico**

La captación de la radiación solar directa puede ser con paneles planos o curvos. La captación en paneles fotovoltaicos planos no exige gran precisión en el seguimiento del sol, y por tanto, los principales problemas que se presentan en la instalación son de carácter eléctrico. Sin embargo, al ser el área de captación muy grande, se incrementa significativamente el costo de la instalación.

La captación en paneles fotovoltaicos curvos colocados en la caldera de un espejo cilíndrico-parabólico exige gran precisión en el seguimiento, y por ende lazos de control más sofisticados. Sin embargo, se produce un ahorro significativo, porque el área total de los captadores es menor.

Los espejos pueden ser construidos de diferentes materiales. La selección de uno u otro material dependerá: de las condiciones de trabajo, de la relación costo-rentabilidad y de su robustez.

El espejo es un elemento de difícil construcción para satisfacer los requerimientos de diseño en cualquier tipo de seguimiento solar, por eso se requiere de un análisis de las características de los más conocidos como por ejemplo:

1. **Plástico:** Se puede lograr un índice de reflexión relativamente alto. Es de bajo costo, abundante, poco frágil. Su transporte y manipulación es menos dificultoso, pero tiene como desventaja que el calor lo deforma, lo que trae como consecuencia que los rayos solares una vez reflejados en el espejo construido con plástico no se concentren en la caldera.
2. **Metal:** Los índices de reflexión son más bajos que los del vidrio y relativamente más bajos que los del plástico. No es frágil, es de fácil manipulación y transporte y el espejo podría construirse de forma continua.
3. **Vidrio:** Es un material de alto nivel de reflexión debido a la pulidez de la superficie, aunque es frágil tiene la ventaja de que se puede sustituir una de sus partes sin la necesidad de hacerlo completo.

Se aplicó un método de laboratorio para determinar reflectancias globales y espectrales de algunas muestras de materiales expuestos. Previo a las medidas de reflectividad espectral, se midió reflectividad global con la esfera integradora y su fuente luminosa, pero usando un pirheliómetro LI-250 como receptor. En la tabla 1 se presentan los valores de algunas muestras:

Tabla 1. Materiales especulares

<b>Materiales</b>	<b>Reflectancia</b>	<b>Materiales</b>	<b>Reflectancia</b>
PVC blanco	0,871	fibra de vidrio pintada de blanco	0,709
aluminio de alta reflectividad (verde)	0,839	espejo de vidrio de 2 mm	0,795
aluminio de alta reflectividad (rosado)	0,853	espejo de vidrio de 3 mm	0,754
aluminio de alta reflectividad (celeste)	0,820	espejo de vidrio de 4 mm	0,712
chapadur prepintado blanco	0,741	acero inoxidable	0,572
Chapa galvanizada	0,588	minar ( Cuba )	0,833
Chapa pintada de blanco nueva	0,582	papel de aluminio ( Cuba )	0,799
Chapa pintada de blanco envejecida	0,656		

De acuerdo a esta tabla 1 como se puede apreciar elegimos como material el aluminio de alta reflectividad (verde) que es el que tiene alto índice de reflectividad con un valor de 0,839, con respecto a los demás materiales.

De esta misma se puede observar que los aluminios especiales son los materiales más apropiados para usar en las aplicaciones que requieran un buen índice de reflexión, montaje liviano y costo moderado. También conviene destacar el caso del PVC blanco, que por su textura es muy difusivo.

### Cálculo de las dimensiones del espejo

En Loja como promedio diario sobre una superficie perpendicular a la radiación caen 4,384 kWh por cada metro cuadrado. Con el hidroseguidor, se prevé captar el 25 % de esta energía, lo que equivale a 1,096 kWh / m<sup>2</sup> cada día. Para generar 15 kWh. será necesario un área de apertura del espejo cilíndrico-parabólico de:

$$A_{ap} = 15 / 1,096 \text{ m}^2 = 13,68 \text{ m}^2 \cong 14 \text{ m}^2.$$

La apertura del espejo será de 2 m de ancho y de 7 m de longitud.

El cálculo de la superficie cilíndrico-parabólica del espejo se realiza a partir de:

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x$$

F (p / 2; 0; 0), coordenadas del foco F en el plano XY.

A partir de una apertura del espejo de 2 m de ancho correspondiente al foco, calculamos:

$$(1)^2 = 2 p \cdot p / 2 \longrightarrow p = 1 \text{ m}$$

La ecuación del espejo (Ec.3.1) es:

$$y^2 = 2 \cdot x \tag{3-1}$$

Los contrapesos pequeños se encontrarán a una distancia aproximada de la línea de los vértices V V' del espejo de 1 m, como se muestra (figura3.5). Estos contrapesos pequeños van acoplados al eje de la caldera su peso es aproximadamente de 1 kg.

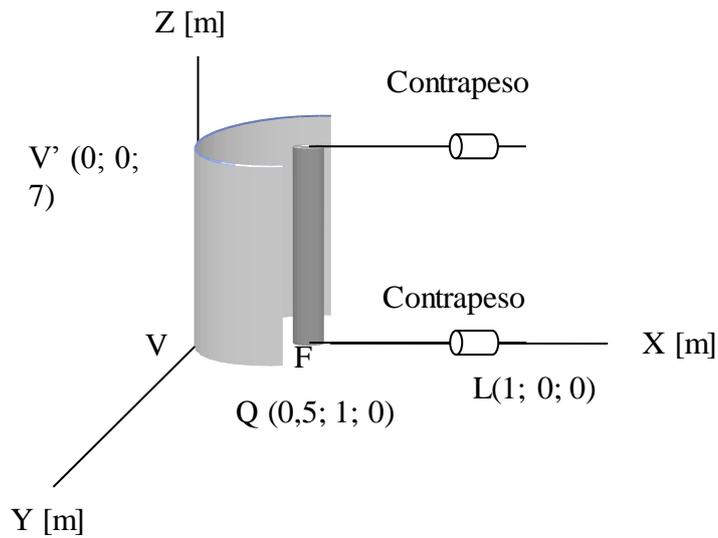


Figura 3.5- Espejo cilíndrico-parabólico.

### Orientación del Espejo Cilíndrico Parabólico

Tenemos la orientación del espejo desde la parte de la fundamentación astronómica del hidroseguidor.

Aquí podemos observar en la (figura 3.6) la orientación del espejo

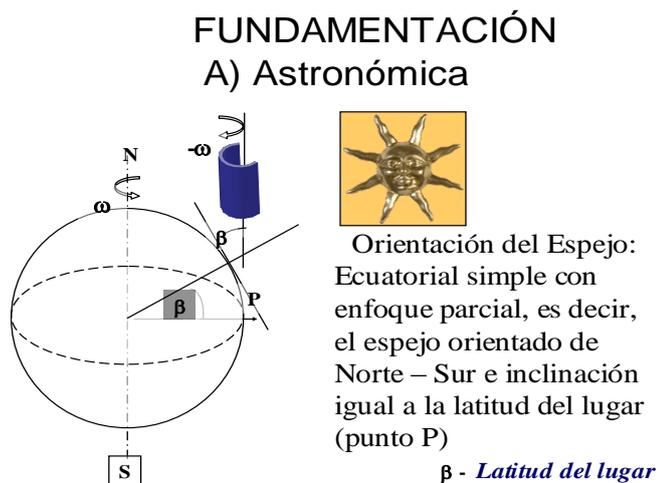
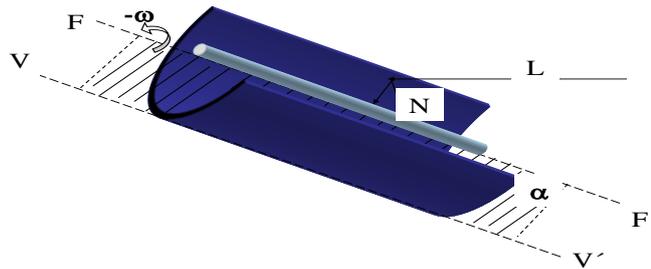


Figura 3.6- Orientación ecuatorial simple con enfoque parcial del espejo

### Propiedad del espejo Cilíndrico – Parabólico:

Todo rayo luminoso  $L$  que incide sobre el espejo paralelo al plano determinado por la línea focal  $FF'$  y la línea de los vértices  $VV'$  se refleja sobre su línea focal.

### B) Óptica



**Figura 3.7- Propiedad del espejo cilíndrico parabólico**

Importancia Técnica de la propiedad del Espejo Cilíndrico Parabólico:

Permite concentrar los rayos solares en la caldera del espejo durante todo el día de trabajo con sólo rotar el espejo a  $-15$  °/h alrededor de su eje

En la Orientación Ecuatorial Simple con enfoque parcial del espejo, la caldera del espejo cilíndrico-parabólico (figura 3.8) se encuentra orientada en la dirección Norte-Sur con una inclinación igual a la latitud del lugar.

La ciudad de Loja se encuentra a  $4^\circ$  de latitud Sur y  $79,12^\circ$  de longitud Oeste; la longitud del espejo es de 7 m y por tanto, la altura  $h$  será:

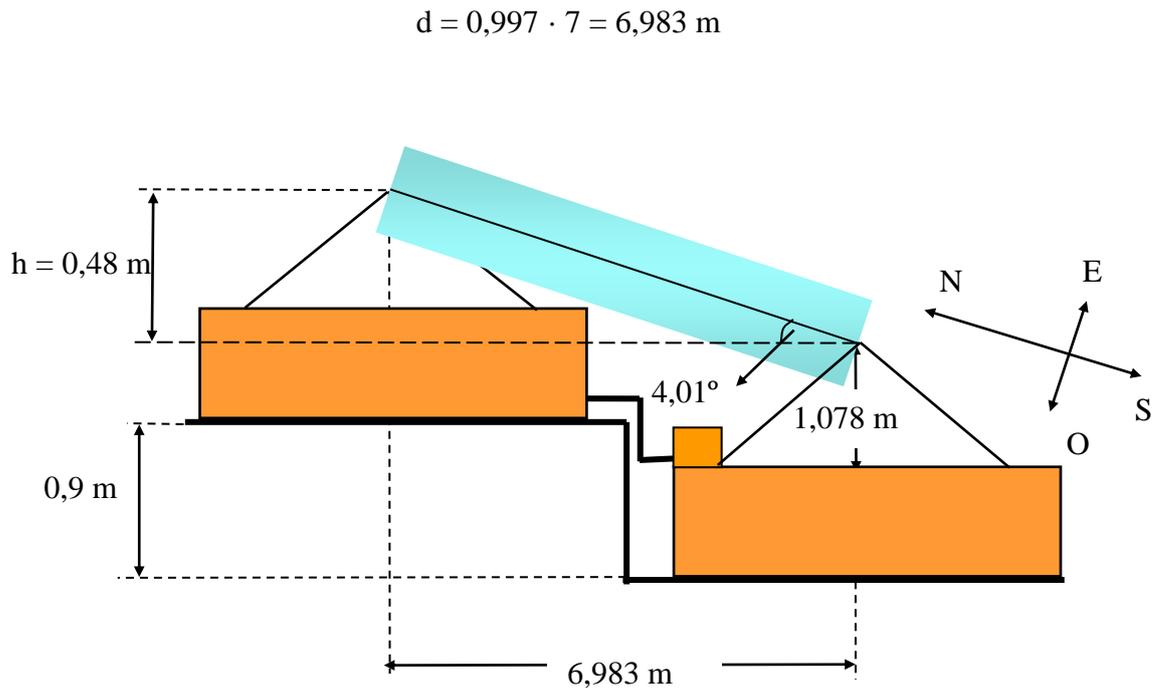
$$\text{Sen } 4,01^\circ = h / 7$$

Entonces:

$$h = 0,0699 \cdot 7 = 0,48 \text{ m}$$

Por el mismo método se determina la distancia entre el centro de los recipientes.

$$\text{Cos } 4,01^\circ = d / 7 = 0,997$$



**Figura 3. 8- Vista lateral del módulo fotovoltaico con hidroseguidor.**

### **Estructura soporte del espejo**

El uso de un soporte comercial de buena calidad es la solución más aconsejable, ya que los metales utilizados en su construcción han sido tratados contra la oxidación y vienen acompañados de tornillería especial para evitar el deterioro por efecto galvánico.

Este último toma lugar cuando dos metales diferentes comparten una superficie de contacto que está expuesta a la intemperie. La presencia de agua en la atmósfera, que siempre contiene impurezas, crea un medio electrolítico. Uno de los metales adquiere un potencial mayor que el otro, convirtiéndose en el ánodo de la junta. La corriente que circula entre ellos produce la destrucción del metal con mayor potencial eléctrico, sin afectar al otro. Este mecanismo, cuando es utilizado en tanques de acumulación para agua caliente, se lo denomina “ánodo de sacrificio”. Cuando se usa el acero inoxidable con alto contenido de cromo se consigue un material muy resistente a la corrosión, incluso la galvánica. Si se encarga un soporte comercial hay que especificar la marca del panel FV que se va a usar, ya que la locación de los agujeros de montaje, así como las dimensiones del marco de sostén, varían con los modelos. Perforaciones hechas a

posteriori no sólo destruyen la defensa del tratamiento contra el óxido en la zona perforada, pero pueden causar accidentes que dañen las celdas FVs.

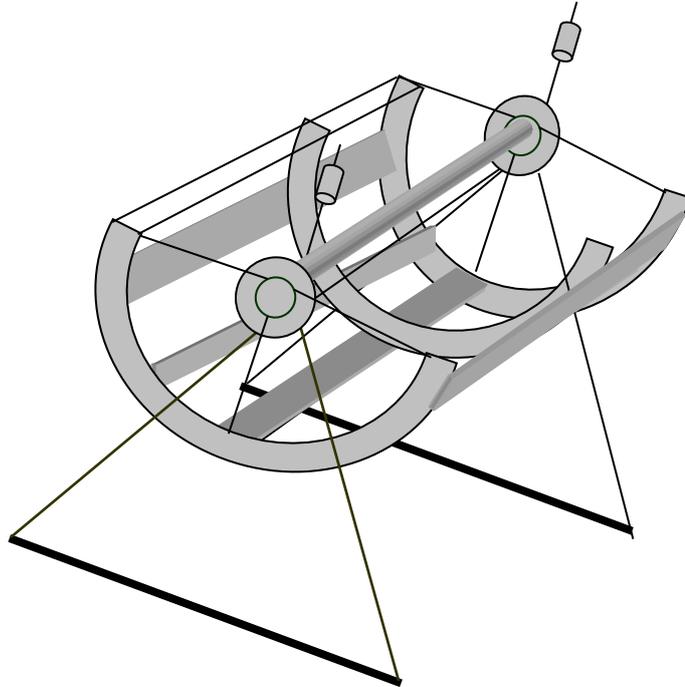
Si se piensa construir el soporte, el material más indicado es el aluminio, pues resiste la oxidación destructiva. La otra ventaja en el uso del aluminio es que al atornillar el marco al espejo cilíndrico parabólico al soporte se tiene una junta de aluminio contra aluminio, lo que ayuda a evitar la corrosión galvánica. Sin embargo, deberá adoptarse precauciones especiales al colocar la tornillería. El uso de largueros de aluminio en ángulo le facilitará la construcción del soporte. Un espesor de 1/8 de pulgada, con lados de 1 y 1½ pulgadas, respectivamente, son adecuados para este tipo de construcción. Si este material es muy caro, el hierro galvanizado puede representar soluciones más económicas. Las varillas de hierro galvanizado en ángulo, perforadas, simplifican enormemente la construcción.

La estructura soporte para el espejo cilíndrico parabólico será armada de aluminio como ya se explico anteriormente porque este es de fácil transporte, manejo y mas económico respecto a otros materiales y su diseño viene especificado o también viene a pedido por el usuario con su respectivos tornillos o remaches, entonces, para la estructura del espejo cilíndrico parabólico necesitamos lo siguiente:

#### Materiales.

- 3 platinas de aluminio de 3,4 m de longitud y 0,004 m de ancho para sostener el espejo transversalmente
- 5 platinas de aluminio de 7 m longitud y 0,004 m de ancho para sostener el espejo longitudinalmente.
- 2 Cojinetes
- 2 Chumaceras de 0,03 m
- 2 varillas de acero de ½" que servirán de base soporte para el espejo
- 6 fijadores su unión será entre el espejo y el eje de la caldera junto con el soporte, son tres a cada lado en forma de T
- 2 contrapesos pequeños para el eje de la caldera para que el movimiento sea indiferente.

- 14 m de alambre de cobre el cual servirá para sostener el eje de la caldera evitando se flexe por su peso se lo colocará a 1m de distancia hasta se completen 6 m.
- 1 Caja de remaches
- 4 poleas pequeñas que servirán como medio para que el cable ascienda o descienda los flotadores esto se puede apreciar en la figura 3.9.



**Figura 3.9- Estructura del espejo cilíndrico parabólico**

### 3.2.5 Diseño de la Caldera del Espejo Cilíndrico Parabólico

Para un radio efectivo de trabajo de la polea de 0,15 m, la distancia que deberá recorrer verticalmente el flotador durante el día será la longitud de la semicircunferencia, la cual es:

$$L = \pi \cdot r = 3,1416 \cdot 0,15 \text{ m} = 0,47 \text{ m}$$

Supondremos una polea de aluminio de un espesor de 0,02 m y un ancho y profundidad del canal de 0,05 m.

### Caldera del espejo cilíndrico-parabólico

La relación de transformación  $C$  en sistemas fotovoltaicos (Ec.3.2) se toma entre 20 y 40. Tomaremos en nuestros cálculos un valor de  $C = 30$ :

$$C = A_{ap} / A_{abs} \quad (3-2)$$

Donde:

$A_{ap}$  es el área de apertura del espejo cilíndrico-parabólico, y

$A_{abs}$  es el área del absorbedor: las fotoceldas de concentración.

Aplicando la expresión de  $C$ , obtenemos:

$$A_{abs} = A_{ap} / C = 14/30 = 0,46 \text{ m}^2$$

Calculamos el radio externo  $r$  de la caldera (Ec.3.3) a partir de una longitud  $L$  de caldera de 7 m de longitud y de un área total  $A$  de  $0,46 \text{ m}^2$ :

$$A = L 2 \pi r,$$

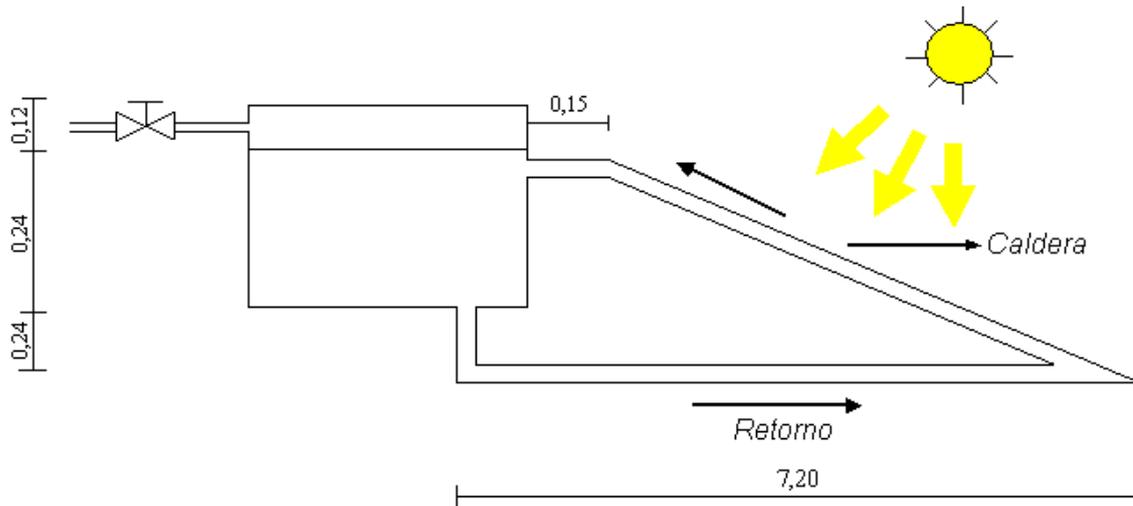
$$r = \frac{0.46}{14 \pi} = 1,04 \text{ cm} \quad (3-3)$$

Utilizaremos para la caldera un tubo de cobre de un espesor de 0,001 m.

### **Sistema de enfriamiento de la caldera**

El sistema de enfriamiento de la caldera (figura 3.10) se efectuará por medio de un sistema de vasos comunicantes a partir de la menor densidad del agua al incrementarse su temperatura producto de los rayos reflejados en el espejo calentarán la caldera.

Como ya se sabe el diámetro y la longitud del tubo de la caldera, asumimos la tubería de retorno que será tubo galvanizado de 0,019 m de diámetro entonces procedemos a calcular el diámetro del tanque (Ec.3.4) necesario para el enfriamiento de la caldera.



**Figura 3.10-** Sistema de enfriamiento de la caldera

**Leyenda:** Todas las unidades están expresadas en metros

Cálculos:

Tubo de cobre

Longitud del tubo de Cu de la caldera = 7,15 m

Diámetro del tubo de Cu de la caldera = 0,1 m

$$V_{icu} = \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{3,14 \cdot (0,01)^2}{4} 7,15$$

$$V_{icu} = 0,0005 \text{ m}^3$$

Tubo Galvanizado

Longitud de retorno del tubo galvanizado = 7,45 m

Diámetro de retorno del tubo galvanizado = 0,019 m

$$V = \frac{3,14 \cdot 0,019^2}{4} 7,45 = 0,0021 \text{ m}^3$$

Entonces:

$$V_{total} = 0,0005 + 0,0021 = 0,0026 m^3$$

$$0,0026 * 7 = 0,0183 m^3 \text{ Volumen del tan que}$$

Diámetro del tanque será:

$$V \text{ tanque} = 0,018 m^3$$

$$h_1 = 0,245 m$$

$$D = \sqrt{\frac{V 4}{\pi H}} = \sqrt{\frac{0,0183 * 4}{\pi * 0,245}} = 0,238 m \quad (3-4)$$

El tanque deberá tener un 30 % libre del volumen contenido (Ec.3.5).

$$\text{Entonces: } 0,03 \cdot 0,0183 = 0,0055 m^3$$

$$h_2 = \frac{4 V}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0,0055}{\pi (0,24)^2} = 0,12 m$$

Altura total del tanque

$$H = h_1 + h_2 = 0,24 + 0,12 = 0,36 m \quad (3-5)$$

Luego el tanque deberá tener una altura de 0,36 m y un diámetro de 0,24 m para que pueda recircular manteniendo la caldera a la temperatura estable.

### 3.3.0 Celdas Fotovoltaicas de Concentración

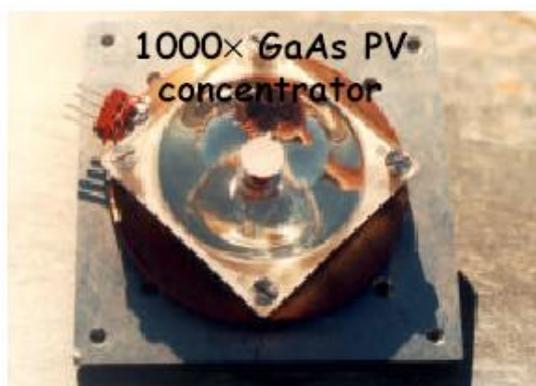
El interés de la concentración para aplicaciones fotovoltaicas radica en la disminución del área de célula necesaria para conseguir un mismo valor de energía. De esta forma, cuanto mayor es el factor de concentración menor es el área de célula necesaria. Existen dos factores que limitan el valor máximo de la concentración: el deterioro de la eficiencia de la célula a concentraciones indefinidamente altas y la

reducción del campo angular de visión de los concentradores. Este último factor conlleva la necesidad de usar estructuras de seguimiento del sol con una precisión que es tanto mayor cuanto mayor sea el factor de concentración.

El aumento de precisión da lugar a una elevación de los costes del conjunto. Sin embargo, aun existen terrenos sin explorar en la alta concentración que pudieran ser comercialmente viables.

Ello es debido a que por un lado, los últimos desarrollos de las células de AsGa han permitido obtener altas eficiencias a concentraciones por encima de 1 000 (es decir, a irradiancias de  $100 \text{ Wcm}^{-2}$ ) que se muestra en la figura 3.11, y a que por otro lado este programa ha creado métodos nuevos de diseño de concentradores que permiten trabajar en alta concentración y con grandes campos angulares de visión, cercanos al 98 % del límite termodinámico.

De entre estos concentradores, el más característico para las aplicaciones fotovoltaicas es el denominado RXI. Este concentrador une a su capacidad de concentrar con gran campo angular, el hecho de ser extraordinariamente compacto (su profundidad es menor que  $1/3$  del diámetro de su apertura).



**Figura 3.11- Vista de un concentrador RXY 1300x**

Se han realizado RXI por inyección de plástico y metalización al vacío. Estos concentradores se midieron dando eficiencias ópticas en el rango 83 % (medida externamente en el Instituto Ioffe) al 87 %, confirmando los valores de concentración de diseño (1 260x) y de campo angular de visión ( $\pm 1,9$  grados). En el trabajo no ha sido

posible hacer una selección de celdas de concentración para la caldera del espejo cilíndrico parabólico por no disponer de información sobre este tipo de celdas.

### 3.4.0 Diseño de un Módulo de Hidroseguidores

La distancia entre las paredes externas del flotador e internas del recipiente es de 0,01 m, con esto se evita que el flotador se pegue del recipiente, deteniéndose el movimiento ascendente o descendente del primero. Para evitar que la manguera flexible se doble, se limita el descenso del flotador hasta 0,1 m del fondo mediante unos tacos colocados en el fondo del recipiente. La salida de la manguera es por la parte inferior del recipiente (ver figura 3.12).

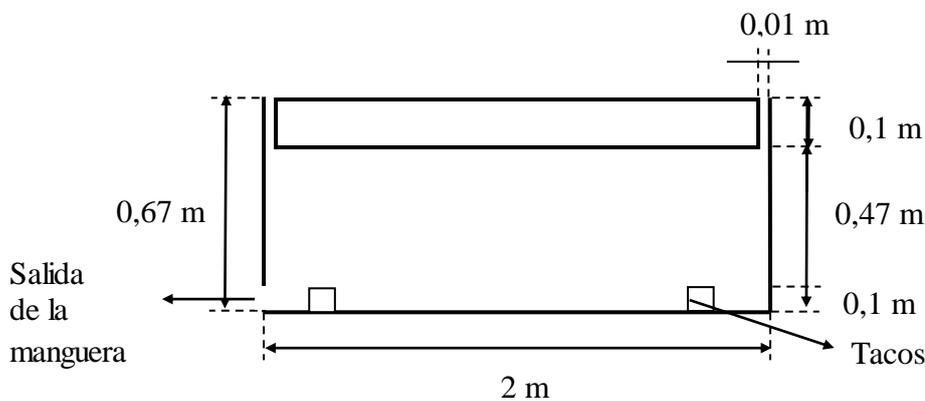


Figura 3.12-Esquema que muestra las dimensiones del motor hidráulico.

El recipiente que se utilizará es de forma cilíndrica; el volumen de líquido contenido en él es:

$$V_r = \pi \cdot (1)^2 \cdot 0,57 = 1,79 \text{ m}^3$$

Para que el hidroseguidor trabaje 12h al día, el gasto volumétrico (Ec.3.6) de salida debe ser:

$$Q = V_r / t = 1,79 / 12 = 0,149 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$Q = \frac{149}{60} \text{ dm}^3 / \text{min} = 2,48 \text{ l} / \text{min} \quad (3-6)$$

*Este tanque puede ser construido de hormigón o también de plástico (PVC), puesto que estos materiales son resistentes y duraderos y no necesitan mantenimiento y tienen gran durabilidad a los agentes externos como por ejemplo el viento, polvo, lluvia etc.*

### **Funcionamiento del Flotador con Carga**

Sobre el flotador con carga del hidroseguidor solar actúan las fuerzas:

$F_c$ , la fuerza del contrapeso,

$F_{rf}$ , la fuerza resultante del flotador con carga, y

$F_v$ , la fuerza del viento sobre la correa.

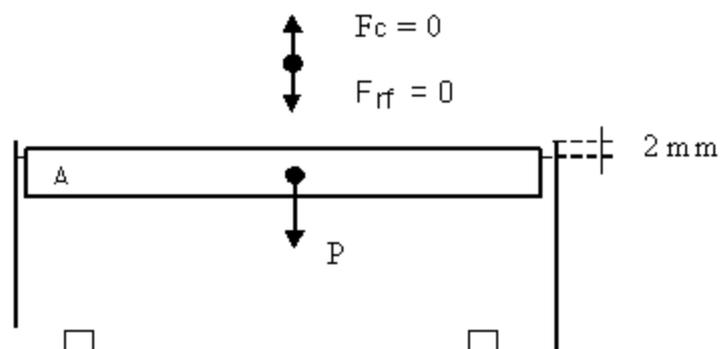
Cuando los contrapesos y el espejo están desconectados (figura 3.13a), la suma de las fuerzas externas sobre el flotador es cero, por tanto, sólo está el peso del flotador con carga. El volumen de agua desplazado por el mismo es:

$$V_a = \pi \cdot (0,99)^2 \cdot 0,098 = 0,302 \text{ m}^3$$

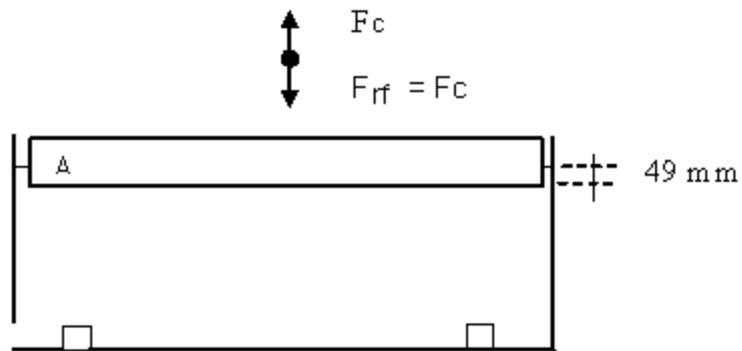
El peso específico del agua es:

$$\gamma_{\text{agua}} = 1 \text{ kgf} / \text{dm}^3 = 1000 \text{ kgf} / \text{m}^3$$

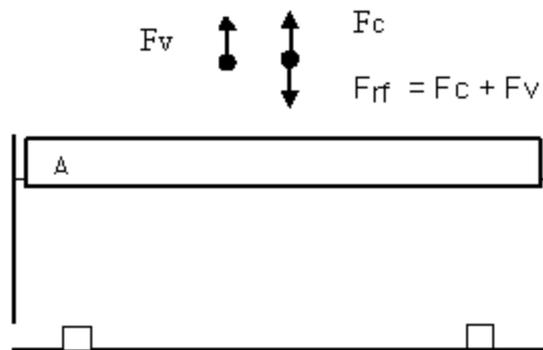
Por tanto el peso del flotador es de 302 kgf.



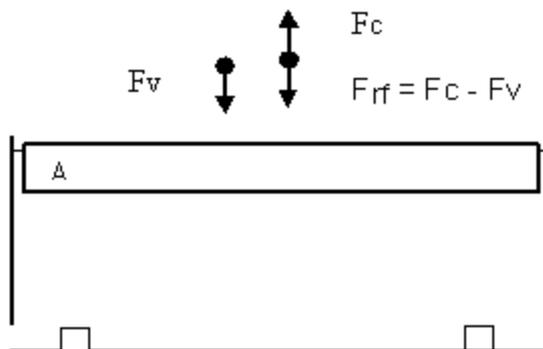
a) Contrapeso y espejo desconectados.



b) Contrapeso conectado y  $F_v = 0$ .



c) Contrapeso conectado y  $F_v$  de igual sentido que  $F_c$ .



d) Contrapeso conectado y  $F_v$  en sentido contrario a  $F_c$ .

**Figura 3.13- Comportamiento del flotador con carga.**

Cuando el contrapeso esta conectado y la fuerza del viento es nula (figura 3.13b), el flotador se hunde hasta la mitad del peso del flotador con carga, o sea:

$$F_c = P / 2 = 151 \text{ kgf.}$$

### Ganancia

La ganancia del motor hidráulico (Ec.3.7) está dada por la relación entre las áreas del flotador y del líquido alrededor del flotador, o sea:

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} = \frac{0,99^2}{1^2 - 0,99^2} = 49,25 \quad (3-7)$$

$$\Delta E_2 / \Delta E_1 = 1 + \alpha = 50,25$$

Donde  $\Delta E_1$  es el empuje del flotador en un recipiente de área infinita, y  $\Delta E_2$  es el empuje del flotador en el recipiente de área finita.

El hundimiento máximo del flotador  $H$  se calcula (Ec.3.8) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} 0,99^2 \cdot H &= (1^2 - 0,99^2) \cdot 49 \text{ mm} \\ H &= \frac{(1^2 - 0,99^2) \cdot 49}{(0,99)^2} = 0,995 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3-8)$$

El sistema tiene una ganancia o variación de (Ec.3.9):

$$\frac{F}{H} = \frac{2 \cdot 151}{0,995} = 303,518 \text{ kgf} / \text{mm} \quad (3-9)$$

La fuerza de 151 kgf fue multiplicada por 2 en la expresión anterior, porque cada flotador en el extremo del espejo ejerce una fuerza de 151 kgf.

### Flotador en el Hidroseguidor por Descarga.

La manguera debe ser lo más flexible que se pueda para evitar que si en algún momento se dobla, se parta.

El motor de corriente directa (MCD), cuyo eje está acoplado a un tornillo sinfín (ver figura 3.14), es para acercar o alejar la manguera, disminuyendo o aumentando, respectivamente, el gasto volumétrico de salida.

Recubriendo el anillo metálico que se encuentra a la entrada de la manguera (figura 3.15), se pone una junta de goma como sellaje.

El gasto volumétrico de salida por un orificio es:

$$Q = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = C_d \cdot \pi \cdot d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3-10)$$

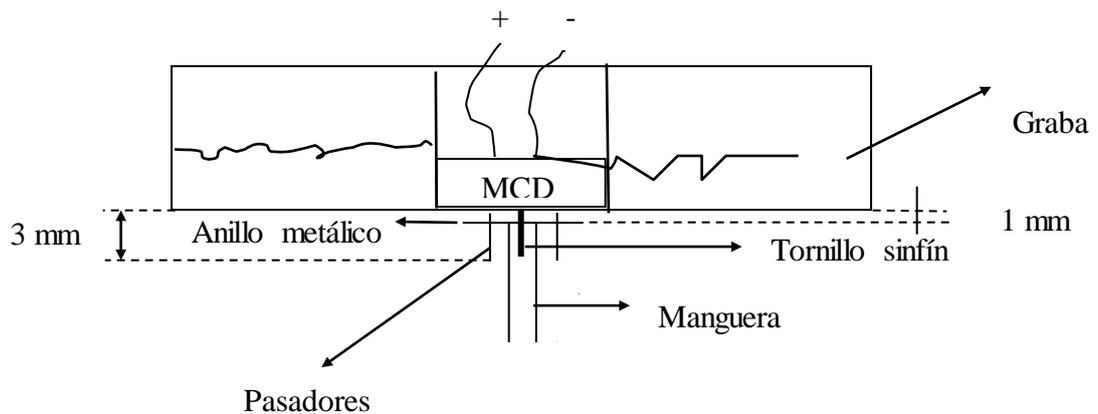
donde:

$C_d$  -es el coeficiente de descarga del orificio,

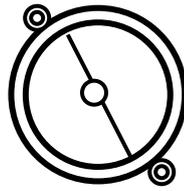
$S$  -es el área del orificio,

$g$  -es la aceleración de la gravedad, y

$h$  -es la altura del punto medio del orificio a la superficie libre del líquido.



**Figura 3.14- Flotador de peso constante y accesorios**



**Figura 3.15- Anillo metálico a la entrada de la manguera flexible .**

El diámetro de restricción de la válvula viajera acoplada a la manguera flexible de salida se obtiene a partir de (Ec.3.11) del gasto volumétrico:

$C_d = 0,61$ ;  $h = 0,5 \text{ mm} = 0,005 \text{ dm}$ ;  $Q = 2,48 \text{ dm}^3/\text{min}$ ;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 353\,160 \text{ dm/min}^2$ .

$$d = \frac{2,48}{0,61 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 353\,160 \cdot 0,005}} = 0,022 \text{ dm} = 2,2 \text{ mm} \quad (3-11)$$

De este valor le asignamos un diámetro interno de 1 cm. a la manguera de salida.

El flotador en el hidroseguidor que trabaja por carga libre del agua es de forma, volumen y peso que el flotador que trabaja por descarga libre del agua.

### 3.5.0 Régimen de Flujo en el Hidroseguidor

Para tener una idea más clara y precisa de los regímenes de corriente vamos examinar los dos tipos de corriente de líquidos en los hidroseguidores: laminar y turbulenta. El tipo de régimen que se presentará en nuestro trabajo estará determinado por el número crítico de Reynolds que más adelante se indicará.

*La corriente es laminar* cuando esta formada por capas sin mezclarse las partículas del líquido, ni variar la velocidad. En este caso las líneas de corriente se determinan por la forma de cauce por el cual fluye el líquido. Cuando la corriente del líquido, en un tubo recto de sección constante, es laminar es decir todas las líneas de corriente son paralelas al eje del tubo, es decir, rectas, no surgen desplazamientos

transversales de las partículas del líquido, por lo que el líquido no se mezcla durante el flujo.

*La corriente es turbulenta* cuando el líquido que fluye por la manguera al desplazarse de un recipiente a otro esta acompañada por una mezcla intensa del líquido y oscilaciones de velocidad y presiones, cuando el líquido toma esta condición el movimiento de las partículas resulta desordenado y las trayectorias tienen a veces la forma de curvas complicadas, esto se debe a que lo largo del tubo surgen desplazamientos transversales y movimiento de rotación de diferentes volúmenes de líquido.

El cambio del régimen de corriente del líquido dado en el tubo se realiza a determinada velocidad de la corriente esto significa que este cambio tiene lugar cuando la velocidad, el diámetro, la viscosidad está determinado por el número real de Reynolds para diferentes flujos y expresarlo por la velocidad real es decir:

### Calculo del Reynolds:

Para el cálculo del Reynolds se debe tomar en cuenta la viscosidad del agua que lo tomaremos a partir de la figura 3.16.

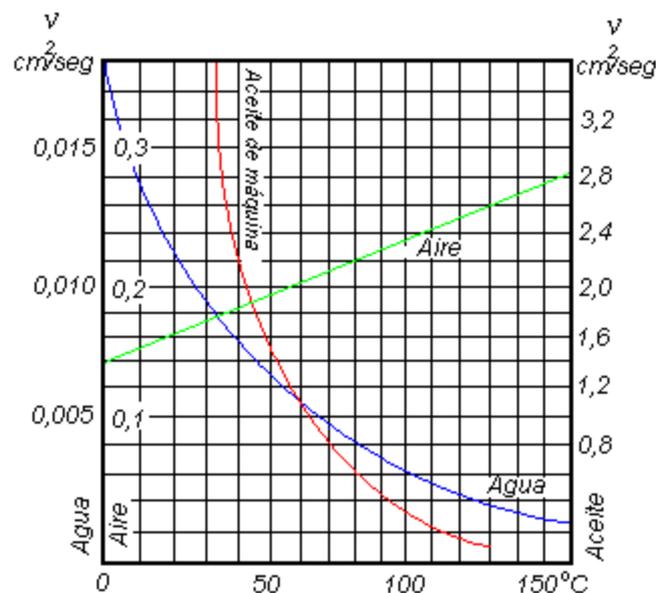


Figura 3.16- Gráfica de coeficiente de viscosidad  $\nu$  en función de la temperatura

$$\text{Re} = \frac{v d}{\nu} \quad (3-12)$$

donde:

$\nu$  - es el coeficiente dinámico de viscosidad.

$\nu$  - es el cinemática de viscosidad.

$d$  - es el diámetro interior de la manguera.

Es decir:

$$\nu = 0,011 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$d = 1 \text{ cm.} \quad \nu = \frac{Q_s}{A} \quad (3-13)$$

$$Q_s = 2,48 \text{ L/min} = \frac{2,48}{60} \cdot 10^3$$

$$Q_s = 41,3 \text{ cm}^3/\text{s} = 41,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Reemplazando en la ecuación (3-13).

$$\nu = \frac{41,3}{\pi (1)^2} \cdot 4 = 52,6 \text{ cm/s}$$

Reemplazando en la ecuación (3-12).

$$\text{Re} = \frac{52,6 \cdot 1}{0,011} = 4\,180,42 > 2\,300$$

Como resultado tenemos un Reynolds que es mayor a 2 300, entonces podemos decir que el régimen de trabajo del hidroseguidor es turbulento.

- **Resistencia de Nivel de líquidos en los recipientes**

Sea el flujo a través de una tubería corta que conecta dos tanques en este caso se define la resistencia al flujo de líquido, como la variación de diferencia de nivel (entre los dos recipientes), necesaria para producir una variación unitaria en el caudal es decir.

$$R = \frac{\text{variación de diferencia de nivel en m}}{\text{variación en caudal en m}^3 / \text{s}}$$

Como la relación entre el caudal y la diferencia de nivel difiere entre el caso del flujo laminar y el flujo turbulento.

En el siguiente sistema de nivel de líquido (figura 3.17) donde el líquido fluye a través de la válvula de carga en el costado del tanque. Si el flujo a través de esta restricción es laminar, la relación entre el caudal de régimen y la carga hidrostática de régimen al nivel de las restricciones queda dada por:

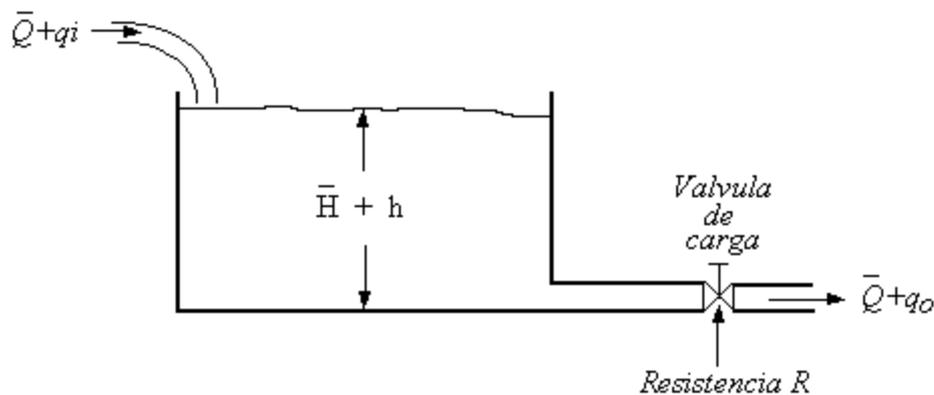
$$Q = K H$$

donde:

$Q$ - es el caudal de régimen en  $\text{m}^3 / \text{s}$ .

$K$ - coeficiente en  $\text{m}^2 / \text{s}$ .

$H$ - carga hidrostática en pies



**Figura 3.17- Sistema de nivel de líquido**

Nótese que la ley que rige al flujo laminar es análoga a la ley de Coulomb que establece que la corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencia.

Para flujo laminar se obtiene la resistencia  $R_l$  como:

$$R_l = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q}$$

La resistencia al flujo laminar es constante y análoga a la resistencia eléctrica. Si el flujo a través de la restricción es turbulento, el caudal (Ec.3-14) de régimen esta dado por.

$$Q = K \sqrt{H} \quad (3-14)$$

donde:

$Q$ - es el caudal del régimen en  $m^3/s$ .

$K$ - es el coeficiente.

$H$ - es la carga hidrostática en m.

Se obtiene la resistencia  $R_t$  para flujo turbulento, de

$$R_t = \frac{dH}{dQ} = \frac{2H}{Q}$$

El valor de la resistencia en el flujo turbulento depende del caudal y de la carga hidrostática. Usando las resistencias de flujo turbulento, se puede linealizar la relación no lineal entre  $Q$  y  $H$  según la ecuación (3-14). Esta es válida siempre que las modificaciones en carga y caudal, a sus valores estabilizados sean pequeños, y esta dada por.

$$Q = \frac{2H}{R_t} \quad (3-15)$$

El valor de  $R_t$  puede ser considerado si los cambios en carga y caudal son pequeños

### 3.6.0 Transmisión en el Hidroseguiemiento

La transmisión en el hidroseguiemiento se realiza por medio de poleas, cables y contrapesos. Las poleas (a ambos lados del espejo) son de un diámetro de 0,30 m.

El cable será fijado a un punto de la ranura de la canal a través de un orificio roscado por dos prisioneros para evitar el deslizamiento del cable con respecto a la polea y disminuir la pérdida de precisión del seguimiento del espejo respecto al sol. La fijación del cable a la polea se encuentra en el punto de tangencia del cable a la polea al inicio del trabajo por la mañana.

### **3.7.0 Posibles Funcionamientos del Módulo de Hidroseguiamiento**

En función a la recirculación o no del agua como fluido portador energético del accionamiento tendremos dos salidas:

1. La no recirculación del agua como fluido portador energético del accionamiento y su uso posterior como agua no contaminada.
2. La recirculación del agua como fluido portador energético del accionamiento y por tanto, de su posterior bombeo.

En los epígrafes los hidroseguidores se encuentran en techos.

### **3.7.1 Módulo de Hidroseguiamiento con Recirculación del Agua**

Este sistema de recirculación del agua por medio de una bomba centrífuga consiste en que después de haber dado todo el seguimiento durante el día el panel cilíndrico parabólico al sol, o sea, cuando ya no exista la captación solar al panel, la bomba centrífuga entra en funcionamiento cuando el tanque II llegue a su nivel máximo, y procederá a descargar el tanque II y al llenado del tanque I, para ello se dispondrá de sensores de nivel en la cual estarán dispuestos de tal forma que, cuando el tanque II llegue a su nivel máximo se acciona la bomba y empiece el ciclo de llenado del tanque II hacia el tanque I, entonces cuando este tanque I llega a su nivel máximo el sensor de nivel dará la orden para el apagado de la bomba quedando así lista para el seguimiento del próximo día.

## Selección de la bomba

A continuación se hará la selección de la bomba se ha tomado en cuenta los siguientes parámetros:

$$\Delta Z = 1,57 \text{ m}$$

$$H_{\text{bomba}} = H_{\text{nec}} + H_{\text{perd}}$$

donde:

$$H_{\text{nec}} = \Delta Z + H_{\text{roz}} + H_{\text{loc}}$$

$$H_{\text{roz}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$H_{\text{loc}} = \sum \xi_{\text{loc}} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 g} \right)$$

$$H_{\text{roz}} = \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 g} \right)$$

$$H_{\text{nec}} = 1,570 \text{ m} + \left( \sum \xi_{\text{loc}} + \frac{\lambda}{D} L \right) \frac{8Q^2}{g \pi^2 d^4}$$

$$V = (1/2)$$

$$\xi_1 = \text{Salida de la bomba} = 0,5$$

$$\xi_{\text{codos } 90^\circ} = 0,8 * 3 = 2,4$$

$\xi$  válvulas = 2,7 (2 Válvulas check)

El sistema trabaja en régimen turbulento

$$\lambda = 0,022$$

Se escoge  $d = \frac{3}{4}$  pulg. = 19,05 mm

Escogiendo  $Q = 0,001\ 116\ \text{m}^3/\text{s}$

Entonces tenemos:

$$H_{nec} = 1,570 + \left( 0,5 + 2,4 + 0,022 * \frac{11,057}{0,01905} \right) \left( \frac{8Q^2}{9,81 * (3,14^2) * (19,05)^4} \right)$$

$$H_{nec} = 1,57\ \text{m}$$

$$Nb = \frac{H \gamma Q}{\eta 1000} = \frac{1,57 * 9810 * 0,001116}{0,9 * 1000} = 0,019\ \text{kW}$$

Por lo tanto se necesitará una bomba de 0,5 kW.

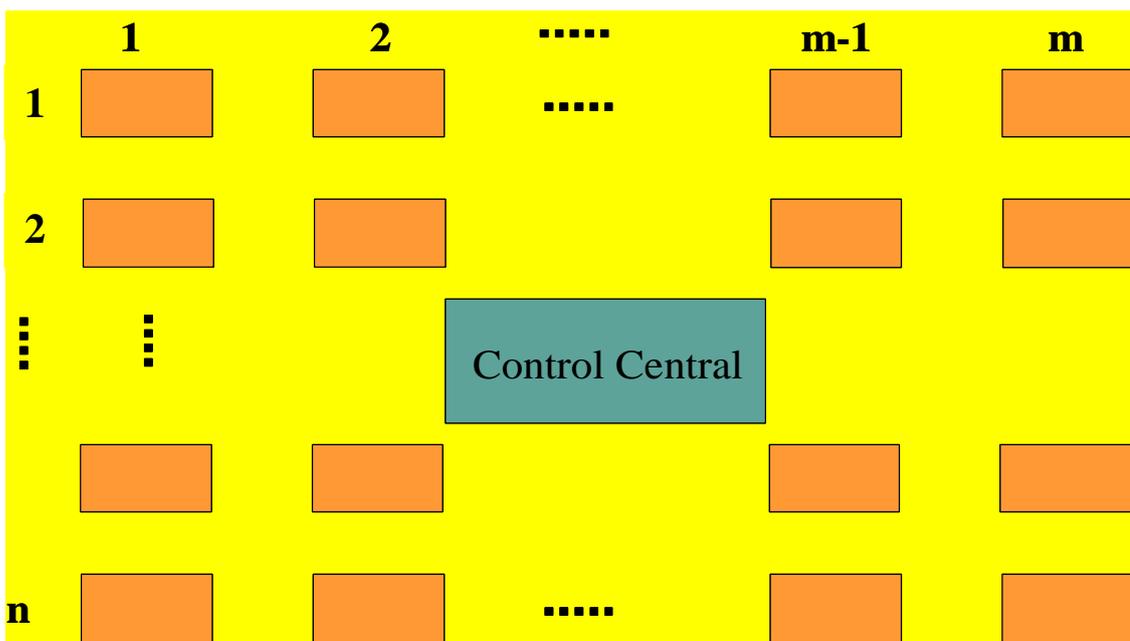
### 3.7.2 Módulo de Hidrosegimiento sin Recirculación del Agua

Este hidrosegimiento sin recirculación del agua implica que el agua va a ser de consumo doméstico para ello se cuenta con el sistema de un módulo fotovoltaico con espejo cilíndrico parabólico seccionado a la mitad, lo que quiere decir que serán dos espejos lo que llevará a tener un soporte en el centro para poder apoyarse sus extremos, cada uno se moverá individualmente, con su respectivo flotador pero el principio de descarga y carga de los tanques se cumple solo los espejos estarán libre el uno del otro, entonces, en el día seguirán iguales al sol y en la noche retornarán en diferente tiempo

según sea el consumo, pero esto se hará partir de las 6 de la tarde cuando ya se haya cumplido el ciclo de seguimiento, pues, los usuarios harán uso del agua de los tanques, para luego proceder a su llenado para que así listo para el próximo día.

### 3.7.3 Central solar con Hidroseguidores en la Pendiente de una loma Orientados de Norte a Sur

Una Central Solar, como se indica en la figura, con módulos de Hidroseguidores instalados en la pendiente de una loma orientada de Norte a Sur permite modular la energía del agua cuando desciende por la pendiente. Si existen,  $n$  filas y  $m$  columnas de los Hidroseguidores, entonces:



**Figura 3 .18-Vista de planta de una Central Solar con Hidroseguidores.**

El primer día de trabajo para el funcionamiento de la Central, habrá que llenar un total de  $m \cdot n / 2$  U cúbicas de agua; sin embargo, a partir del segundo día sólo habrá que bombear (reponer con gasto de energía externa) un volumen de  $m$  U cúbicas de agua. Más explícitamente, si  $m$  fuese 10 y  $n$ , 100; entonces: el primer día de trabajo se requerirán 500 U cúbicas de agua; y a partir del segundo día de trabajo sólo 10 U

cúbicas de agua habrá que bombear (reponer) a la primera fila (fila en posición más alta) para accionar la Central Solar. Esto provoca una reducción drástica en el consumo de energía de la instalación, que justifica la importancia económica y social de los Hidroseguidores como tecnología solar emergente.

El que esta potencialidad se convierta en realidad mueve y avala nuestro trabajo sobre: **Control del Seguimiento de un Espejo Cilíndrico-Parabólico accionado con Hidroseguidor.**

### **3.8.0 Controles del Módulo de Hidrosegguimiento**

En la estación fotovoltaica con hidrosegguimiento se utilizan los siguientes controles automáticos:

1. Control del sincronismo entre el movimiento del espejo y el sol.
2. Control de la carga y descarga de los recipientes.
3. Control de la carga y descarga de la batería.
4. Control de la entrega de energía eléctrica al usuario autónomo.

### **3.9.0 Conclusiones**

En este capítulo se efectuó el diseño de un módulo fotovoltaico con hidrosegguimiento porque se incrementa alrededor de un 25 % la cantidad de energía captada; el hidrosegguidor es un sistema que optimiza la explotación de sistemas de suministro de agua a edificios y utiliza la energía de la gravedad para captar otro tipo de energía no convencional: la energía de la radiación directa del sol; además, se reduce el área de las fotoceldas en un valor igual a la relación de concentración del espejo.

# CAPITULO IV

## **CAPITULO IV**

### **MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL**

#### **4.1.0 Introducción**

En este capítulo realizaremos:

1. La modelación del sistema de control
2. La simulación en SIMULINK del comportamiento del sistema de control
3. El ajuste óptimo por el método de las Oscilaciones Mantenido de Ziegler-Nichols de los parámetros del sistema de control.
4. Selección del tipo de acción de control
5. Análisis de estabilidad del sistema de control
6. Determinación del error a estado de régimen estacionario

#### **4.2.0 Diagrama en Bloques del Sistema de Control de la Posición del Espejo Cilíndrico-Parabólico**

Teniendo en cuenta el diseño de un módulo fotovoltaico con hidroseguimiento y de sus componentes que actúan conjuntamente en este proceso a continuación se indicara el diagrama de bloques del sistema de control que se muestra en la figura 4.1.

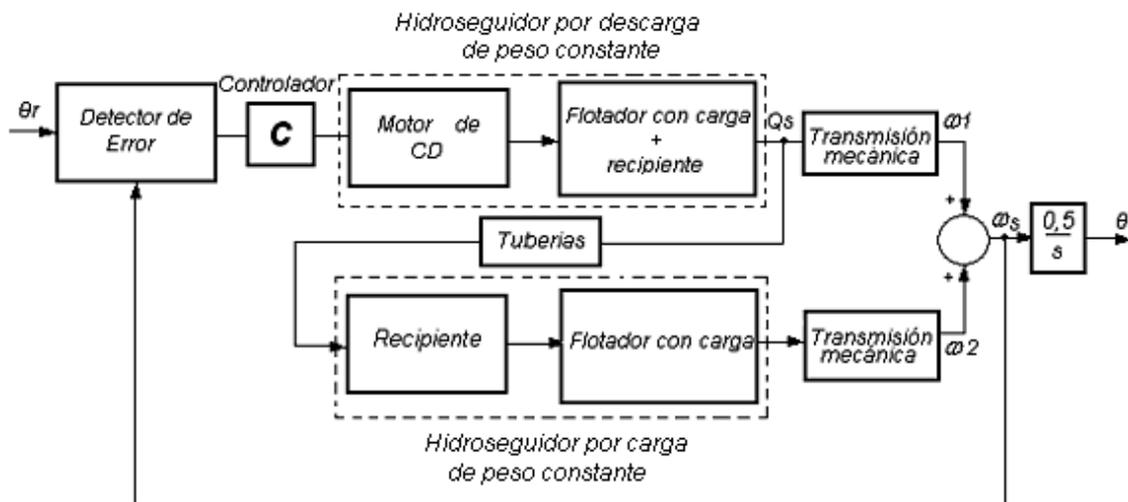


Figura 4.1- Diagrama de la Posición del Espejo Cilíndrico-Parabólico

### 4.3.0 Esquema en Bloques del Sistema de Control de la Posición del Espejo Cilíndrico-Parabólico.

El sistema de control estudiado puede ser representado gráficamente mediante un diagrama en bloques como se muestra en la figura 4.2.

#### Diagrama a.

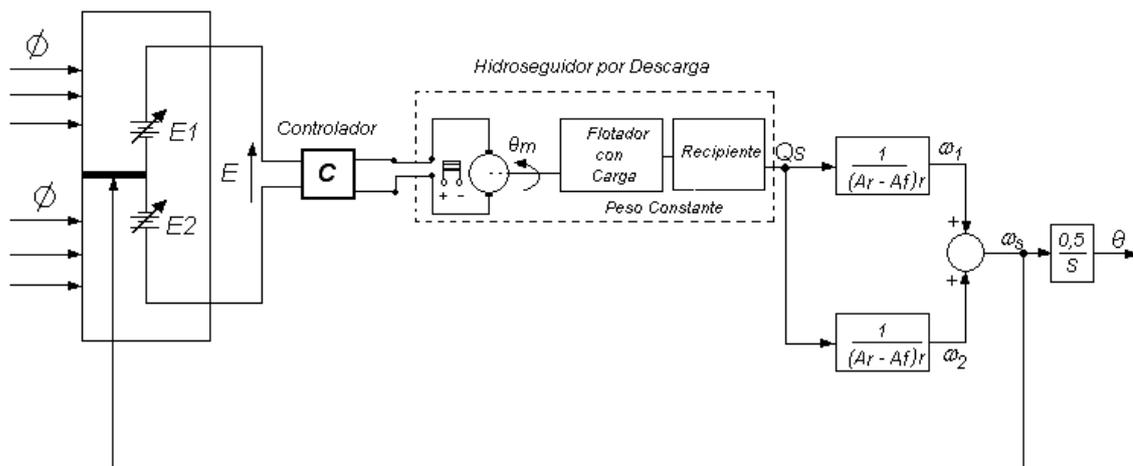
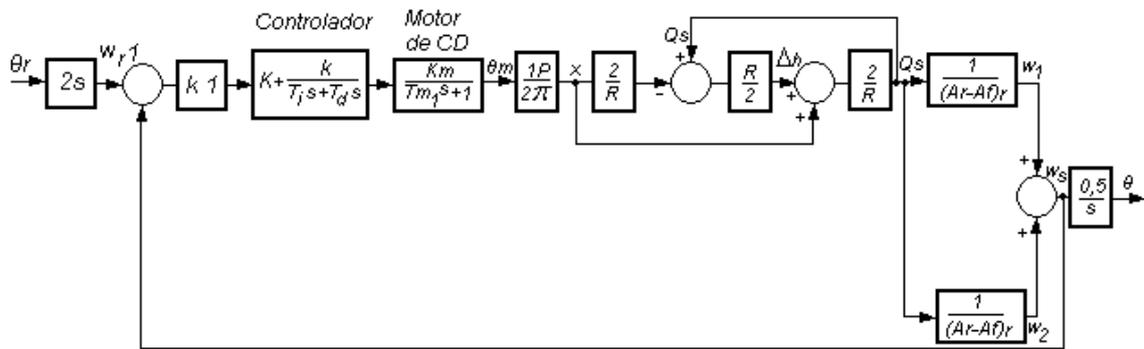


Figura 4.2.- Diagrama en bloques del sistema de control

La aplicación de la anterior versión al diagrama de bloques de la figura 4.2 da origen a la representación que se ilustra en la figura 4.3

**Diagrama b.**



**Figura 4.3- Diagrama de bloques del sistema de control.**

En la figura 4.3 se tiene que:

$\theta_r$  - es el valor deseado o prescrito

$\theta$  - es la variable controlada.

$K_m$ -es la ganancia del motor de CD.

$T_m$ -constante de tiempo del motor de CD.

$K_I$ - ganancia del detector de error.

Considerando que en el sistema de control mostrado en la figura 4.3 el controlador y cada uno de los componentes del sistema se encuentran de tal forma que nos permita conocer las respuestas transitorias, también conocida como comportamiento dinámico de la respuesta  $\omega_s$ , estas pueden ser determinadas mediante procedimientos matemáticos. La aplicación al diagrama de bloques de la figura 4.3 da origen a las representaciones que se ilustran a continuación.

#### 4.4.0 Modelos de los Componentes del Sistema de Control

- **Referencia**

La velocidad constante  $\omega_r$  de rotación de la tierra

$$\omega_r = 15^\circ / h = \frac{1}{12} \pi \text{ rad} / h = \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{12} \pi \text{ rad} / s$$

$$\omega_r = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad} / s, \quad \text{función escalón}$$

$$\theta_r = \left( \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{12} \pi \right) t$$

$$\theta_r = 7,27 \cdot 10^{-5} t, \quad \text{función rampa}$$

Donde el tiempo esta dado en segundos.

#### 4.4.1 Modelo Matemático del Detector de Error

Supondremos un modelo matemático del detector de error:

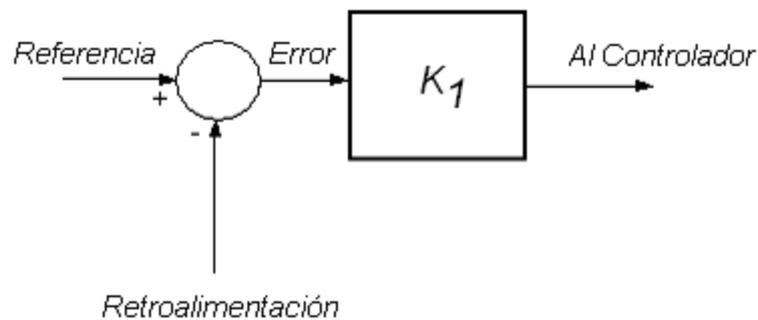


Figura 4.4- Modelo de un detector de error

Usaremos un detector de error con  $K = 0,217 \text{ V} / \text{rad}$ .

#### 4.4.2 Modelo del Motor de CD

A partir de la función de transferencia del motor de CD:

$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

y de los parámetros del motor:

$$\begin{aligned}n &= 500 \text{ r/min.} \\P &= 1 \text{ hp} \\P &= 0,75 \text{ kW.} \\I_a &= 4,1 \text{ A.} \\R_a &= 7,56 \ \Omega. \\L_a &= 55,0 \text{ mH.} \\V &= 230 \text{ V}\end{aligned}$$

Se obtienen  $K_m$  y  $T_m$ :

$$K_m = \frac{K}{R_a f + K K_b} = \frac{0.034}{(7.56)(4 \times 10^{-4}) + (0.034)(4.19)} = 0.23$$

$$T_m = \frac{R_a J}{R_a f} = \frac{(7.56)(0.068)}{(7.56)(4 \times 10^{-4}) + (0.034)(4.19)} = 3.53 \text{ s}$$

Que nos permite escribir la Función de Transferencia del motor de CD.

$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{0,23}{s(3,53s + 1)}$$

#### 4.4.3 Modelo del Hidroseguidor que Trabaja por Descarga de Agua

Paso de la rosca del tornillo sin fin que acciona el motor de CD: 0,8 mm.

Haremos uso del diagrama de bloques inducido en la figura 2.35. Cálculo de la resistencia hidráulica R:

Donde:

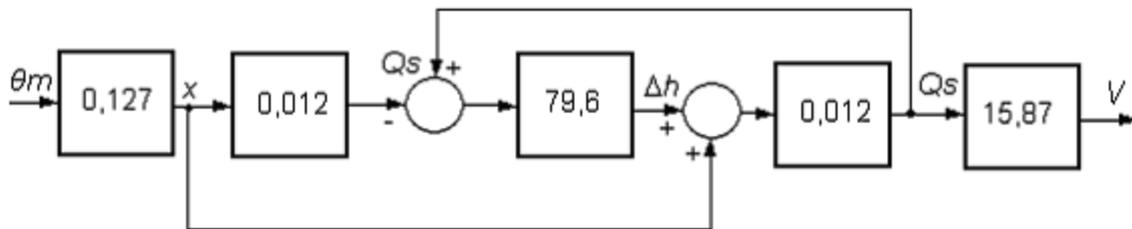
$$\begin{aligned}\Delta h &= 2,2 \text{ mm.} \\x &= 1 \text{ mm.} \\1P &= 0,8 \text{ mm.}\end{aligned}$$

$$Q_s = 2,48 \text{ dm}^3 / \text{min} = \frac{2,48}{60} \cdot 10^{-3} = 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

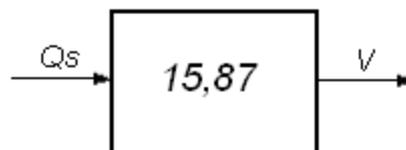
$$R = 2 \frac{H}{Q_s} = 2 \frac{x + \Delta h}{Q_s}$$

$$R = 2 \frac{2,2 + 1}{0,02} \cdot 10^{-3} = 159,3$$

Obteniéndose el diagrama de bloques:



#### 4.4.4 Modelo del Hidroseguidor que Trabaja por Carga de Agua



#### 4.4.5 Modelo del Sistema de Transmisión Mecánica

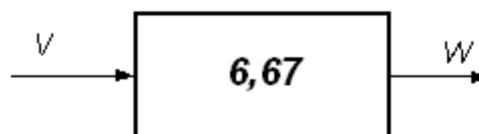


Figura 4.5- Transmisión Mecánica

La transmisión en este proceso de seguimiento solar está determinada por la siguiente ecuación.

$$\omega = \frac{1}{0,15} V \Rightarrow \omega = 6,67 V$$

#### 4.5.0 Esquema de Bloques del Sistema de Control

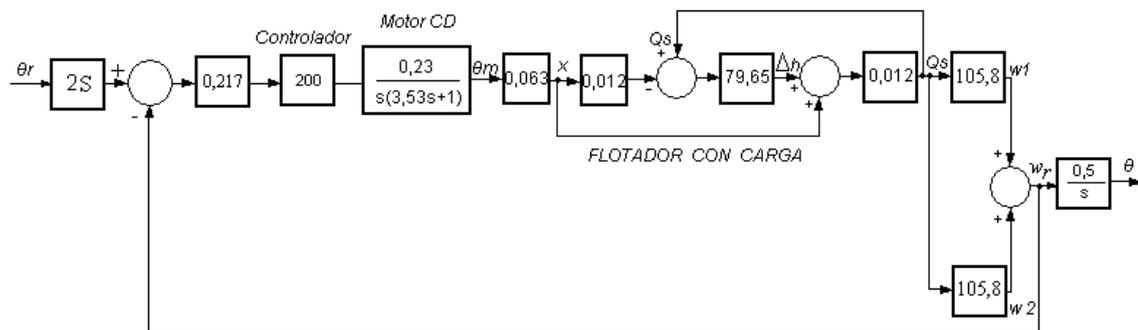


Figura 4.6 - Sistema de Control del seguimiento del sol

#### 4.6.0 Representación en SIMULINK del Sistema de Control

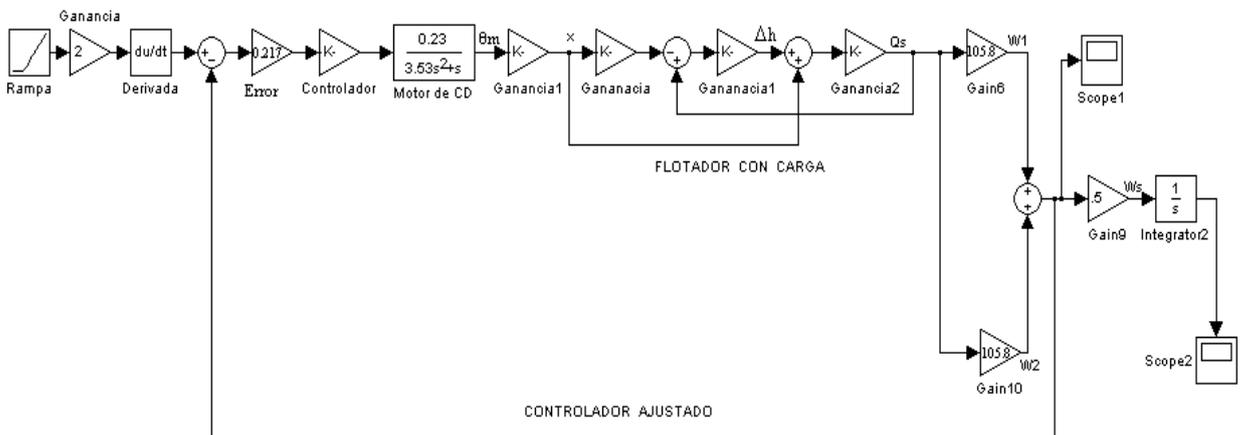


Figura 4.7- Representación en Simulink del sistema de control

#### 4.6.1 Ajuste óptimo del Controlador por el Método de las Oscilaciones Mantenido de Ziegler-Nichols

Se aplicó el Método de las Oscilaciones Mantenido según se describe en el epígrafe al sistema indicado en la figura 4.7; y se obtuvieron los siguientes resultados:

$$K_c = 400; \quad T_c = 6.5 \text{ s}$$

Los valores de ajuste para las diferentes acciones de control son:

$$\text{Controlador P:} \quad K = 0,5 \cdot 400 = 200$$

$$\text{Controlador PD:} \quad K = 240 K_c \ ; \ Td = 0,78 \text{ s}$$

$$\text{Controlador PI:} \quad K = 180 K_c \ ; \ Ti = 5,39 \text{ s}$$

$$\text{Controlador PID:} \quad K = 240 \ ; \ Ti = 3,25 \text{ s} \ ; \ Td = 0,78 \text{ s}$$

#### 4.7.0 Resultados Experimentales

Una vez ajustado el sistema por el método de Ziegler-Nichols se obtienen la respuesta escalón y la variable controlada  $\theta$  para cada controlador.

##### 4.7.1 Respuesta temporal a las acciones de control

Una vez ajustado el controlador por el método de Ziegler-Nichols obtuvimos la respuesta del sistema para las acciones de control P, PD, PI y PID ante las entradas al diagrama de bloques:

- Escalón

$$\omega_{r1} = 14,54 \cdot 10^{-5} \text{ rad / s}$$

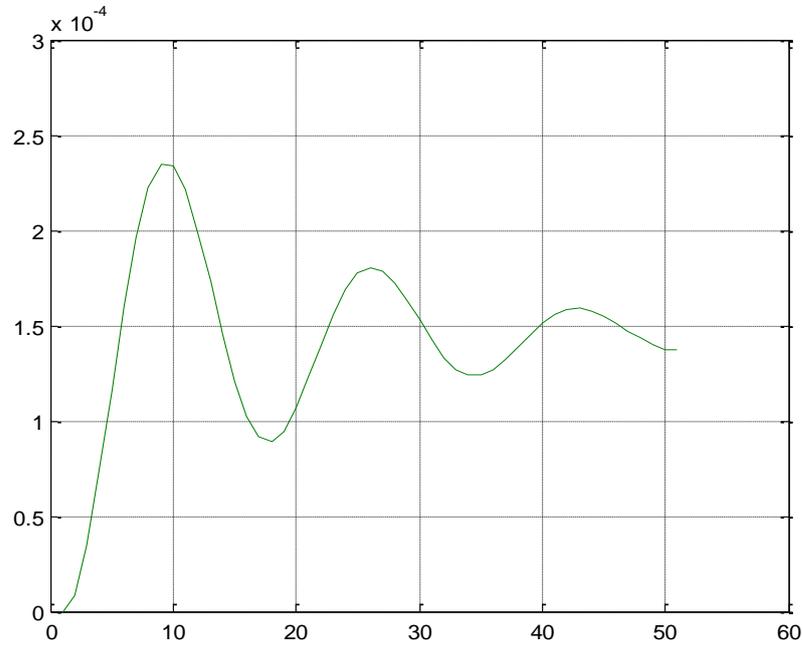
- Rampa

$$\theta_r = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

Los resultados experimentales para cada caso se muestran a continuación:

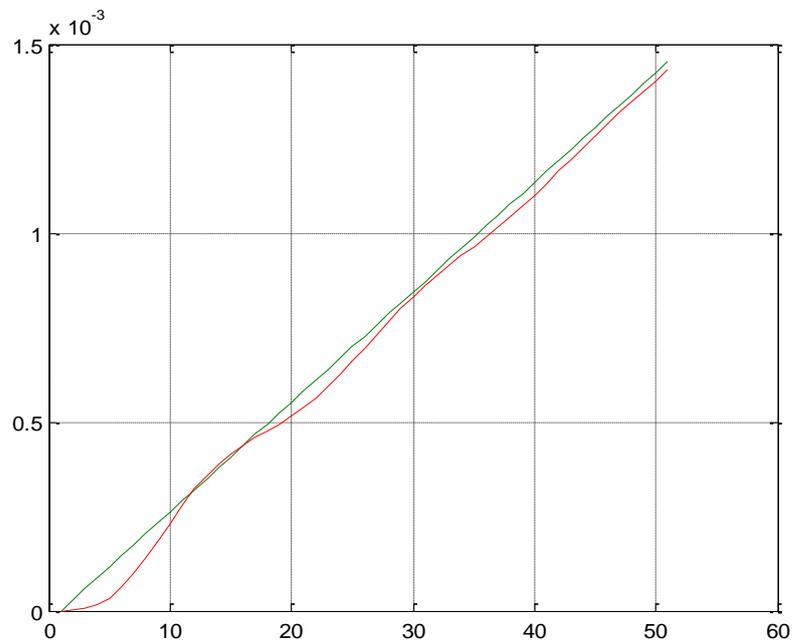
**Respuesta al Ajuste del Controlador P.**

- Respuesta a escalón de velocidad  $W_r$



**Figura 4.8 - Respuesta al escalón del Controlador P**

- Respuesta a la rampa  $\theta_r$  de posición

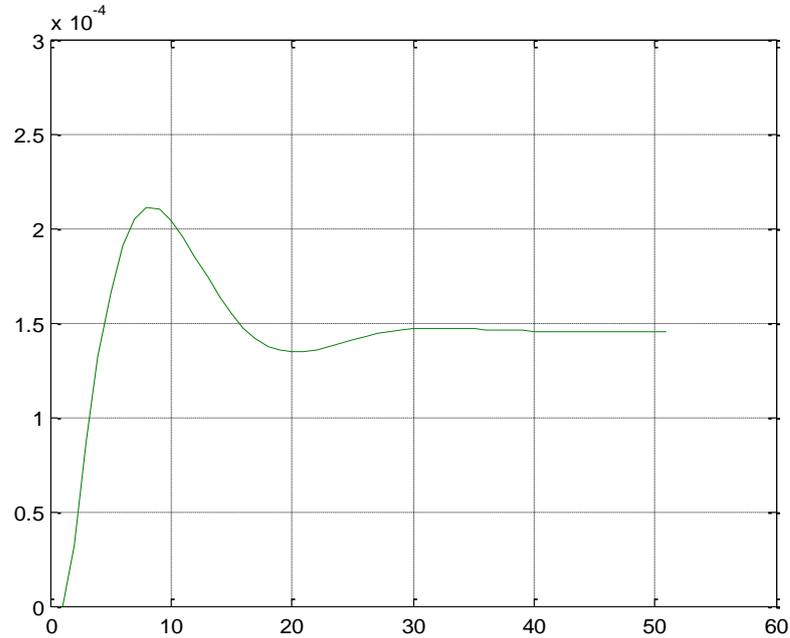


Referencia — Respuesta

**Figura 4.9 -Comparación de los ángulos  $\theta_r$  y  $\theta$  del controlador P**

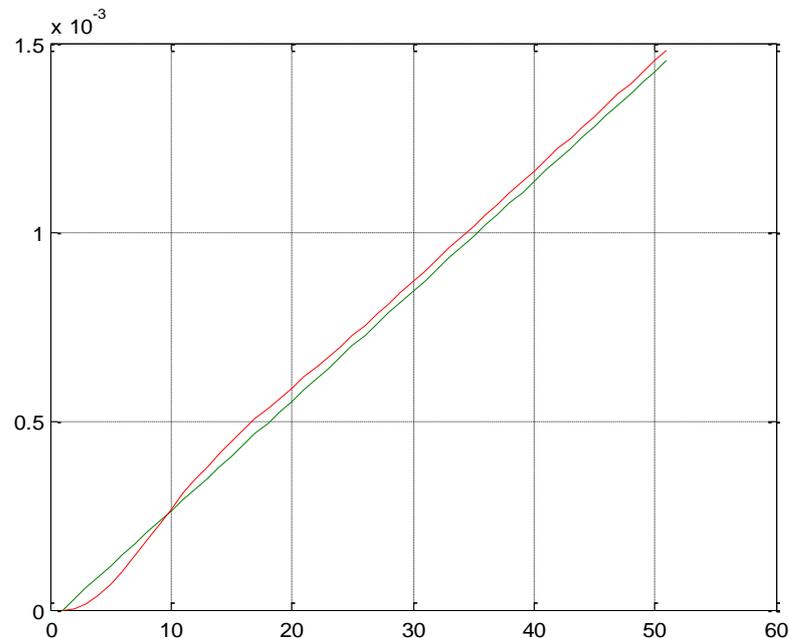
**Respuesta al Ajuste del Controlador PD**

- Respuesta a escalón de velocidad  $W_r$



**Figura 4.10 –Respuesta al escalón del Controlador PD**

- Respuesta a la rampa  $\theta_r$  de posición

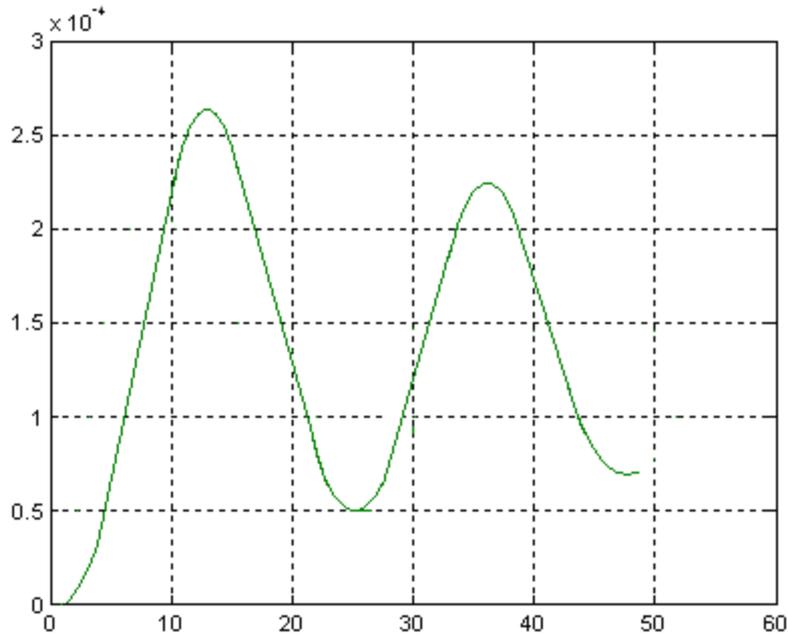


Referencia ——— Respuesta ———

**Figura 4.11- Comparación de los ángulos  $\theta_r$  y  $\theta$  del controlador PD**

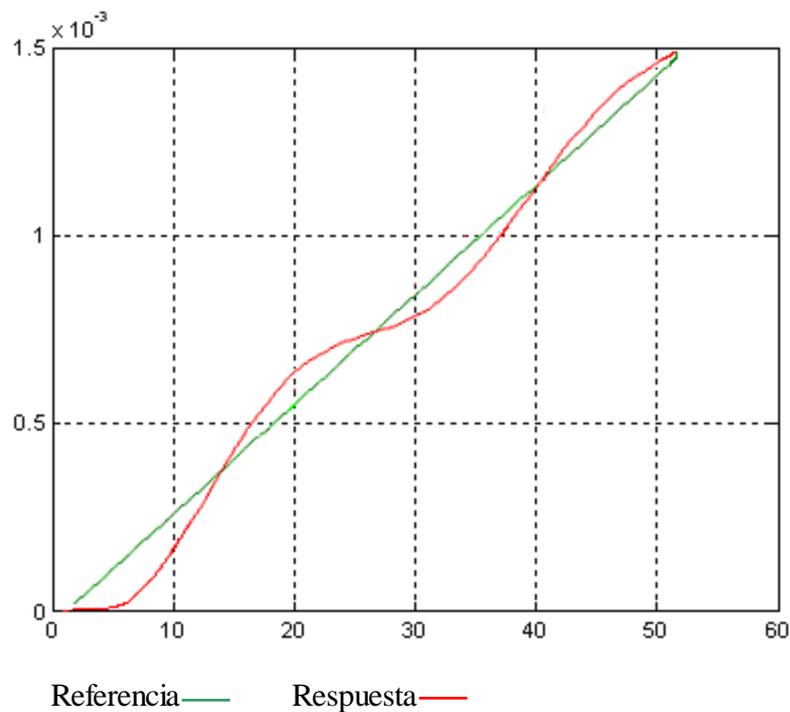
**Respuesta al Ajuste del Controlador PI**

- Respuesta a escalón de velocidad  $W_r$



**Figura 4.12 –Respuesta al escalón del controlador PI**

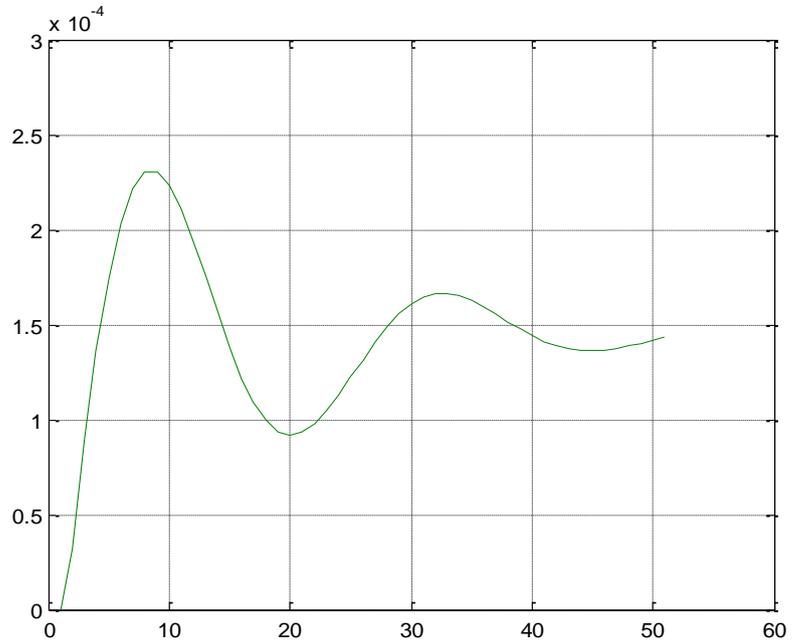
- Respuesta a la rampa  $\theta_r$  de posición



**Figura 4.13 -Comparación de los ángulos  $\theta_r$  y  $\theta$  del controlador PI**

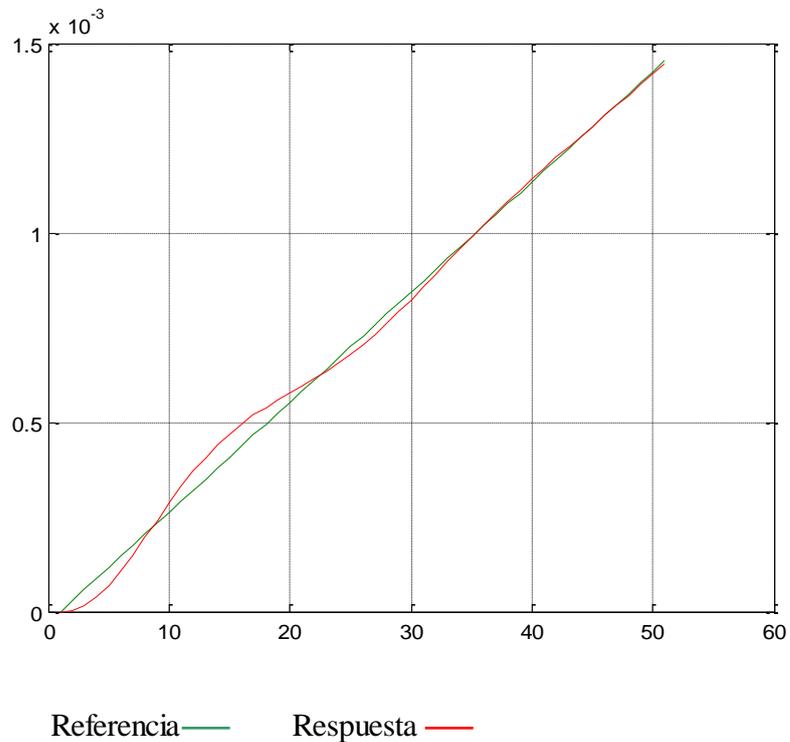
**Respuesta al a Ajuste del Controlador PID**

- Respuesta a escalón de velocidad  $W_r$



**Figura 4.14 – Respuesta al escalón del controlador PID**

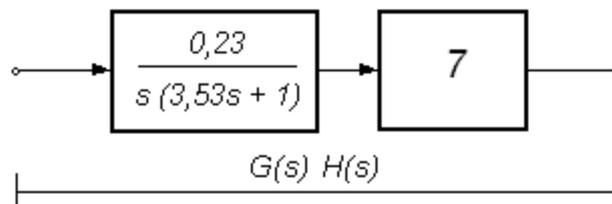
- Respuesta a la rampa  $\theta_r$  de posición



**Figura 4.15 -Comparación de los ángulos  $\theta_r$  y  $\theta$  del controlador PID**

#### 4.7.2 Errores Estacionarios a los Ajustes P y PID

##### ¿Quién es $G(s)H(s)$ ? Cuando el Ajuste es Proporcional



$$G(s)H(s) = \frac{1,61}{s(3,53s + 1)}$$

- **Respuesta al Escalón**

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1,61}{s(3,53s + 1)} \Rightarrow \infty$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{X_{eo}}{1 + \infty} = 0 \text{ rad/s}$$

- **Respuesta a la Rampa**

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1,61}{s(3,53s + 1)}$$

$$K_v = \frac{1,61}{1} = 1,61$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{Xe_0}{1,61}$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{7,27}{1,61} \cdot 10^{-5} = 0,30 \text{ rad}$$

Como se observa los resultados analíticos de los errores a régimen estacionario coinciden con los resultados simulados obtenidos para el controlador P.

### ¿Quién es $G(s)H(s)$ ? Cuando el Ajuste es PID

$$G_c(s) = K + \frac{K}{T_i s} + K T_d s$$

donde:

$$K = 240$$

$$T_i = 3,25 \text{ s}$$

$$T_d = 0,78 \text{ s}$$

$$G_c(s) = \frac{K T_i s + K T_d T_i s^2 + K}{T_i s}$$

$$G_c(s) = \frac{K T_d T_i s^2 + K T_i s + K}{T_i s}$$

$$G_c(s) = \frac{608,4 s^2 + 780 s + 240}{3,25 s}$$

$$G(s)H(s) = \frac{0,23}{s(3,53s + 1)} \cdot \frac{608 s^2 + 780 s + 240}{3,25 s}$$

$$G(s)H(s) = \frac{0,23 \cdot 3,5 \cdot 10^{-5}}{s^2 (3,53s + 1)} \cdot \frac{608 s^2 + 780 s + 240}{3,25 s}$$

$$G(s)H(s) = 0,400 \frac{608 s^2 + 780 s + 240}{s^2 (3,53s + 1)}$$

- **Respuesta al Escalón**

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} 0,400 \frac{(600s^2 + 780 + 240)}{s^2 (3,53s + 1)}$$

$$Kp \Rightarrow \infty$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{Xeo}{\infty} = 0 \text{ rad / s}$$

- **Respuesta a la Rampa**

$$Kv = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s) H(s)$$

$$Kv = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot 0,400 \frac{608 s^2 + 780s + 240}{s^2 (3,53s + 1)}$$

$$Kv \Rightarrow \infty$$

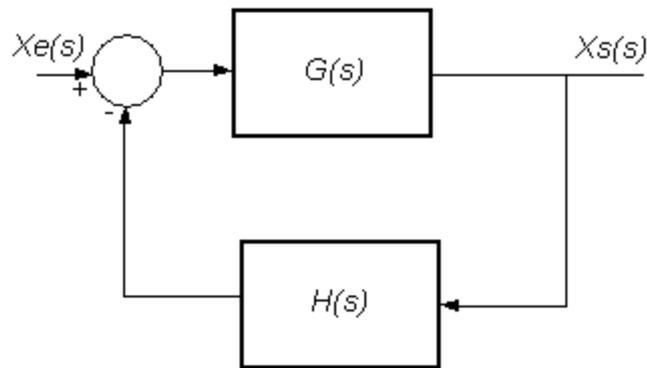
$$\varepsilon(\infty) = \frac{Xeo}{Kv} = \frac{Xeo}{\infty} = 0 \text{ rad}$$

Como se observa los resultados analíticos de los errores a régimen estacionario coinciden con los resultados simulados obtenidos para el controlador PID.

#### 4.7.3 Estabilidad a los Ajustes P y PID

Luego de haber comprobado en forma analítica y en forma gráfica el ajuste de los controladores anteriormente indicados en este epígrafe vamos a evaluar la estabilidad del sistema ante los ajustes P y PID, del controlador.

Como es conocido:



$$\frac{Xs(s)}{Xe(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) H(s)}$$

$P = 1 + G(s) H(s) = 0$ , Ecuación característica del sistema de control

- **Análisis de estabilidad del ajuste P**

$$P = 1 + G(s) H(s) = 1 + \frac{1,61}{s(3,53s + 1)} = 0$$

$$P = \frac{s(3,53 + 1) + 1,61}{s(3,53s + 1)} = 0$$

$$P = 3,53s^2 + s + 1,61 = 0$$

En el software MATLAB nos arroja los siguientes resultados:

$P = [3, 53 \quad 1, 61];$

roots (P)

**ans:**

**- 0, 1416 + 0,6603 i**

**- 0, 1416 + 0,6603 i**

Podemos apreciar de estos resultados que la parte real da un valor negativo por lo que afirmamos por el Teorema Fundamental de la Estabilidad de los sistemas lineales de tiempo continuo que el sistema con acción de *control P* es estable. Resultado que concuerda con los obtenidos experimentalmente.

- **Análisis de estabilidad del ajuste PID**

$$P = 1 + G(s)H(s) = 0$$

$$P = 1 + 0,400 \frac{608s^2 + 780s + 240}{s^2 (3,53s + 1)} = 0$$

$$P = s^2 (3,53s + 1) + 243,2s^2 + 312s + 96 = 0$$

$$P = 353s^3 + s^2 [1 + 243,2] + 312s + 96 = 0$$

En MATLAB

```
P = [353 243,2 312 96];
roots (P);
```

**ans:**

```
- 0.1680 + 0,8580 i
- 0.1680 - 0.8580 i
- 0.3558
```

Podemos apreciar de estos resultados que la parte real da negativa por lo que afirmamos por el Teorema Fundamental de la Estabilidad de los sistemas lineales de tiempo continuo que el sistema con acción de *control PID* es estable. Resultado que concuerda con los obtenidos experimentalmente.

#### 4.7.4 Selección del Tipo de Acción de Control del Sistema de Seguimiento

Sobre la base del análisis de estabilidad, del error a estado de régimen estacionario y del comportamiento temporal obtenido de la simulación del comportamiento del sistema en SIMULINK seleccionamos como acción de control para el seguimiento del sol al Controlador PID con los parámetros:

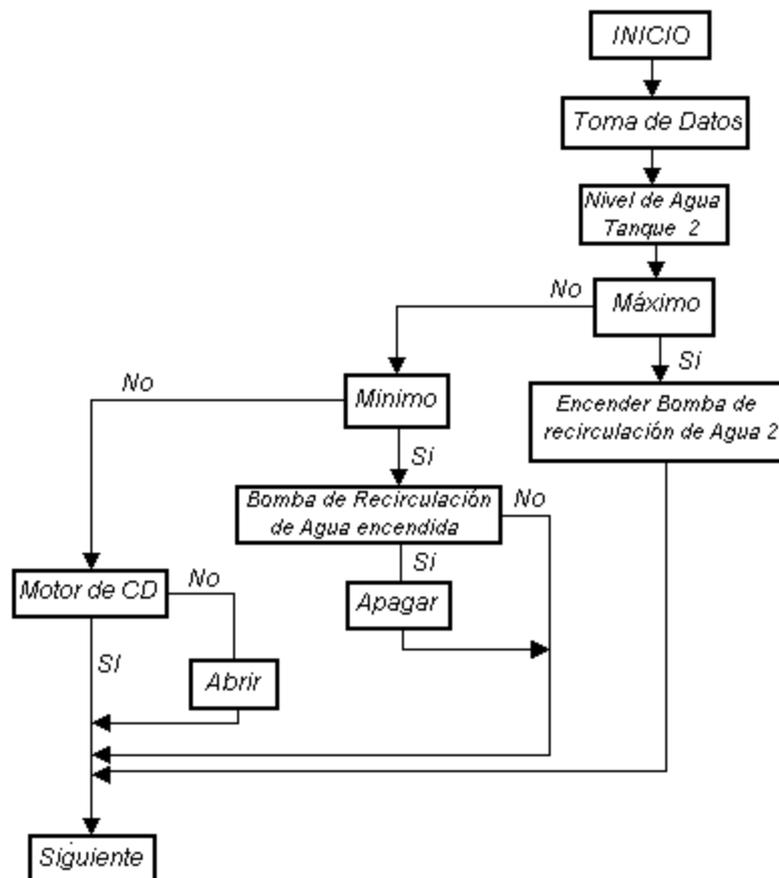
$$K = 240; \quad T_i = 3,25 \text{ s}; \quad T_d = 0,78 \text{ s}$$

de ajuste óptimo del controlador.

El algoritmo del control y la arquitectura del sistema de la instalación se indican a continuación.

#### 4.7.5 Algoritmo de Control

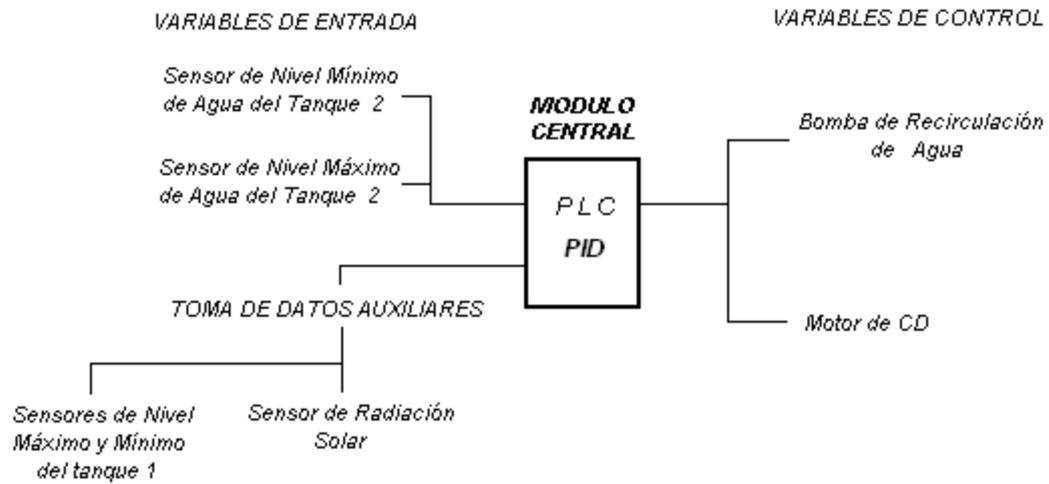
El algoritmo de control se representa de la siguiente forma:



#### 4.16 -Algoritmo de Control

### 4.7.6 Arquitectura del Sistema de Control

Se indica en el presente epígrafe la arquitectura del sistema de control del seguimiento del sol con un espejo cilíndrico parabólico.



### 4.17 – Arquitectura del Sistema

# CAPITULO V

## **CAPITULO V**

### **VALORACIÓN ECONÓMICA, SOCIAL Y MEDIO AMBIENTAL**

#### **5.1.0 Valoración Económica**

Es muy importante para cualquier profesional tener conocimientos económicos, en la actualidad estos están estrechamente relacionados con la mayoría de trabajos a ser realizados en el desempeño de su profesión.

Esta es una de las razones por la que en este trabajo se realiza un análisis económico del mismo, mostrando de forma tabulada el precio detallado de todos los componentes ha utilizarse en el un sistema de control lo cual nos brinda una medida del costo.

Para la realización de la valoración técnica-económica es necesario apoyarse en una de las dos formas de cálculos económicos existentes para la estimación de costos:

1. Preestimación.
2. Estimación firme.

Para este trabajo se realizo el método de preestimación, ya que requiere de menos detalles que en el caso de una estimación firme. A su vez permite realizar un análisis extremadamente importante para determinación si es factible o no.

Se realizaron diferentes pasos para poder lograr obtener una valoración económica completa, comenzando por:

- Presupuesto de gasto.
  - Listado de materiales.
  - Gasto de salario.

## Presupuesto de Gastos

**Tabla 4.1 Listado de materiales y componentes.**

<b>Elementos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario USD</b>	<b>Costo total. USD</b>
Panel Solar de Concentración	1	900	900
Detector de Error de Posición	1	85	85
PLC Programable SCMT100 con PID interno	1	600	600
Motor de CD	1	48	48
Baterías Solares	1	120	120
Regulador de carga de batería	1	66	66
Convertidores CDA	1	99	99
Sensor de Nivel	4	3,50	14
<b>Costo Total</b>			<b>1932</b>

## Gasto de Salario

Suponiendo que este sistema esta diseñado y solo es necesario montarlo de forma real para su funcionamiento, esto se puede lograr solamente con dos personas de un Ingeniero Electromecánico y de un técnico medio en eléctrica. Los cuales presentan unos salarios básicos en USD. \$ 2.50 / hora el técnico y \$ 6 / hora el Ingeniero respectivamente. Asumiendo que dicha instalación pueda realizarse en un tiempo límite de cinco días, el presupuesto de gasto será:

$$C_s = (2.50 * 40) + (6 * 40) = 340 \text{ USD.}$$

El precio total ( $C_T$ ) del equipo estará dado por la suma del salario total de horas del trabajo del personal más el costo de los componentes utilizados.

$$C_T = \$ 340 + \$ 1932 = 2272 \text{ USD.}$$

### 5.2.0 Valoración Social

Desde el punto social. En nuestro país, en los últimos tiempos, la electrificación de objetivos sociales y económicos utilizando las energías renovables y en especial la solar fotovoltaica va teniendo de un desarrollo considerable que pretende humanizar la labor del hombre.

Con este sistema de obtención de energía eléctrica se puede llevar esta hasta las zonas más intrincadas donde prácticamente los tendidos eléctricos son de difícil montaje.

Gracias a sus ventajas, se podrán instalar en lugares de difícil acceso Hospitales rurales, Consultorios médicos, Escuelas rurales así como Viviendas rurales tendrán la posibilidad de tener y disfrutar de este servicio.

Insumos en USD:

1. Panel fotovoltaico curvo de concentración

Los costos de fabricación y los precios de venta de los módulos comerciales para los diferentes tipos de tecnologías de celdas solares se muestran en la tabla 1.

### 5.3.0 Valoración Medio Ambiental

El presente proyecto supone una oposición a los modos habituales de producción energética. Por un lado, observamos la importancia de las energías renovables por su carácter inagotable, a diferencia de la finitud de recursos de los combustibles fósiles. Pero además implican considerables ventajas medioambientales, suficientes como para alejarlas de las energías tradicionales que ya conocemos, así como de la nuclear, evitando los efectos de su uso directo (contaminación atmosférica, residuos, etc.) y los

derivados de su generación (excavaciones, minas, canteras, etc.). Los efectos de la energía solar fotovoltaica sobre los principales factores ambientales son los siguientes:

**Clima:** La generación de energía eléctrica directamente a partir de la luz solar no requiere ningún tipo de combustión, por lo que no se produce polución térmica ni emisiones de CO<sub>2</sub> que favorezcan el efecto invernadero.

**Geología:** Las células fotovoltaicas se fabrican de silicio, elemento obtenido de la arena, muy abundante en la naturaleza y del que no se requieren de cantidades significativas. Por lo tanto, en la fabricación de paneles fotovoltaicos no se producen alteraciones en las características litológicas, topográficas o estructurales del terreno.

**Suelo:** Al no producirse contaminantes, ni vertederos, ni movimientos de tierra. La incidencia sobre las características físico-químicas del suelo o su erosionabilidad es nula.

**Aguas superficiales y subterráneas:** No se produce alteración de los acuíferos o de las aguas superficiales ni por consumo, ni por contaminación de residuos vertidos.

**Flora y fauna:** La repercusión sobre la vegetación es nula, y al eliminarse los tendidos eléctricos, se evitan los posibles efectos perjudiciales para las aves.

**Paisaje:** Los paneles solares (curvos o planos) tienen distintas posibilidades de integración lo que hace que sea un elemento fácil de integrar y armonizar en diferentes tipos de estructuras, minimizando su impacto visual. Además, al tratarse de sistemas autónomos, no se altera el paisaje con postes ni tendidos eléctricos.

**Ruidos:** El sistema fotovoltaico es absolutamente silencioso, lo que representa una clara ventaja frente a los generadores de motor en viviendas aisladas.

**Medio Social:** El suelo necesario para instalar un sistema fotovoltaico de dimensión media, no representa una cantidad significativa como para producir un grave impacto. Además, en la mayoría de los casos, se pueden integrar en las azoteas de las viviendas o edificios.

El impacto del deterioro ambiental se refleja en la sociedad y en la economía de los pueblos de diferentes formas y a distintos plazos, de ahí que se estime. Si la calidad ambiental se deteriora, se afecta la calidad de vida.

Las instalaciones fotovoltaicas tendrían un notable impacto entre la población si pudieran formar parte de la gestión de las empresas que ofrecen electricidad. De esta forma, el usuario sería una verdadera unidad de producción de ahorro energético. La cuestión es restituir parte de los electrones “sucios” que consumimos, si se desea mantener condiciones adecuadas de salud, calidad de vida y desarrollo sostenible, es necesario preocuparse por el mantenimiento y mejoramiento de la integridad ambiental para así, no agregar costos que pueden ser muy costosos a los proyectos de desarrollo.

Si se ahorra en el área ambiental, por no incrementar la inversión inicial, se termina gastando sumas mayores en plazos más largos o se pierde la inversión, “lo barato sale caro”. A esto se le llama costo de la inacción, la cual es más elevada que la acción previsoras. El impacto ambiental es variable en el tiempo, pudiendo crecer los procesos erosivos, mantenerse, como en el caso de las construcciones o decrecer como en las reforestaciones o restitución del paisaje.

En nuestro país y específicamente nuestra ciudad y provincia se trabaja para impulsar las energías renovables, ya que ayudarían a reducir la dependencia energética del petróleo y el gas natural. Su objetivo es que, para los próximos años el consumo de energía provenga de energías renovables, pero esto no debe ser contemplado como una solución mágica.

Una caracterización completa de este proyecto en la obtención de energía en un determinado lugar debería incidir en los siguientes puntos:

- Se produce de *forma continua e inagotable*: en último término, casi todas las formas de energías renovables provienen directa o indirectamente del sol. Por ello podemos asegurar su permanencia.

- *No contaminante*: no produce emisiones de dióxido de carbono, y sus residuos como por ejemplo el de los acumuladores son fácilmente tratables. A pesar de producir efectos negativos sobre el medio ambiente, éstos son mucho menores.
- *Son fuentes autónomas*: Es decir podrían montarse, de una forma u otra, en todas las áreas geográficas. Aunque resulta evidente que existen zonas más propensas a su utilización de acuerdo a sus condicionantes climáticos.
- *Favorecen el equilibrio interterritorial*: ya que pueden instalarse en zonas rurales sin perjudicar al medio ambiente ni ocasionando daños al mismo.

Que el futuro de la energía solar tenga en Ecuador un panorama más halagüeño depende, pues, ahora mismo de la pericia del legislador para comprender que en el rango doméstico ésta debe tener un marco diferente, y que permita que los particulares participen de la reducción de emisiones tóxicas causantes del efecto invernadero.

Algunas ciudades como la nuestra y especialmente en su provincia, ya han adoptado medias en este sentido para la generación fotovoltaica por su efecto favorable sobre el medio ambiente y su independencia en la producción de energía.

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

1. El sistema de control del seguimiento del sol con espejo cilíndrico-parabólico se modeló, simuló y ajustó por el Método de las Oscilaciones Mantenido de Ziegler-Nichols.
2. Se evaluó el comportamiento temporal, la estabilidad y el error a estado de régimen estacionario de las diferentes acciones de control ajustadas por el Método de las Oscilaciones Mantenido de Ziegler-Nichols. Los resultados teóricos y experimentales coincidieron.
3. Se seleccionó la acción de control PID para el controlador a partir del análisis científico-técnico del sistema.
4. Con la comprobación teórica y experimental desarrollada por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols y las predicciones teóricas planteadas en las hipótesis podemos afirmar que la captación de energía solar a través de espejos cilíndricos-parabólicos resultó, altamente eficiente.
5. Al comprobar que la parte teórica coincide con la experimental se comprueba que la captación de la energía solar fotovoltaica mejora el aprovechamiento de la energía solar utilizando hidroseguidores.
6. El sistema de captación solar con espejos cilíndricos-parabólicos accionados por hidroseguidores no produce efectos de contaminación ya que no emplea sustancias tóxicas de carácter biológico y químico ya que básicamente el sistema transforma la energía solar en energía eléctrica.

## RECOMENDACIONES

En futuras investigaciones de la temática se recomienda:

1. Construir y evaluar experimentalmente el sistema de control del seguimiento del sol con un controlador PID, el mismo que podría proporcionar un control integral del sistema.
  
2. Estudiar e implementar lazos de control como:
  - Control de la carga y descarga de los recipientes.
  - Control de la carga y descarga de la batería.
  - Control de la entrega de la energía eléctrica al usuario autónomo.

Los mismos que podrían mejorar la explotación práctica del sistema.

# BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alabart J.A. Y otros. Sistemas solares fotovoltaicos. CIES. Cuba 1996.
2. Dávila G. L Energía Solar fotovoltaica. Editorial Limusa S.A. México. 1992.
3. Ogata K Ingeniería de control moderna. Tomo I .Madrid, España. Ediciones del Castillo, 1984.
4. Parrado. A.J. Elementos de Ingeniería de sistemas y controles automáticos para procesos. Parte II, Editorial Pueblo y educación. La Habana 1986
5. Soto, D.B. Metodología para el hidroseguimiento de paneles fotovoltaicos, accionados por descarga y carga libre del agua. Ec. UNL, Área de energía las industrias y los recursos naturales no renovables, 2003.
6. Varela A.J. Controles automáticos para procesos. Parte I. Ediciones ENPES, 1991.

## INTERNET

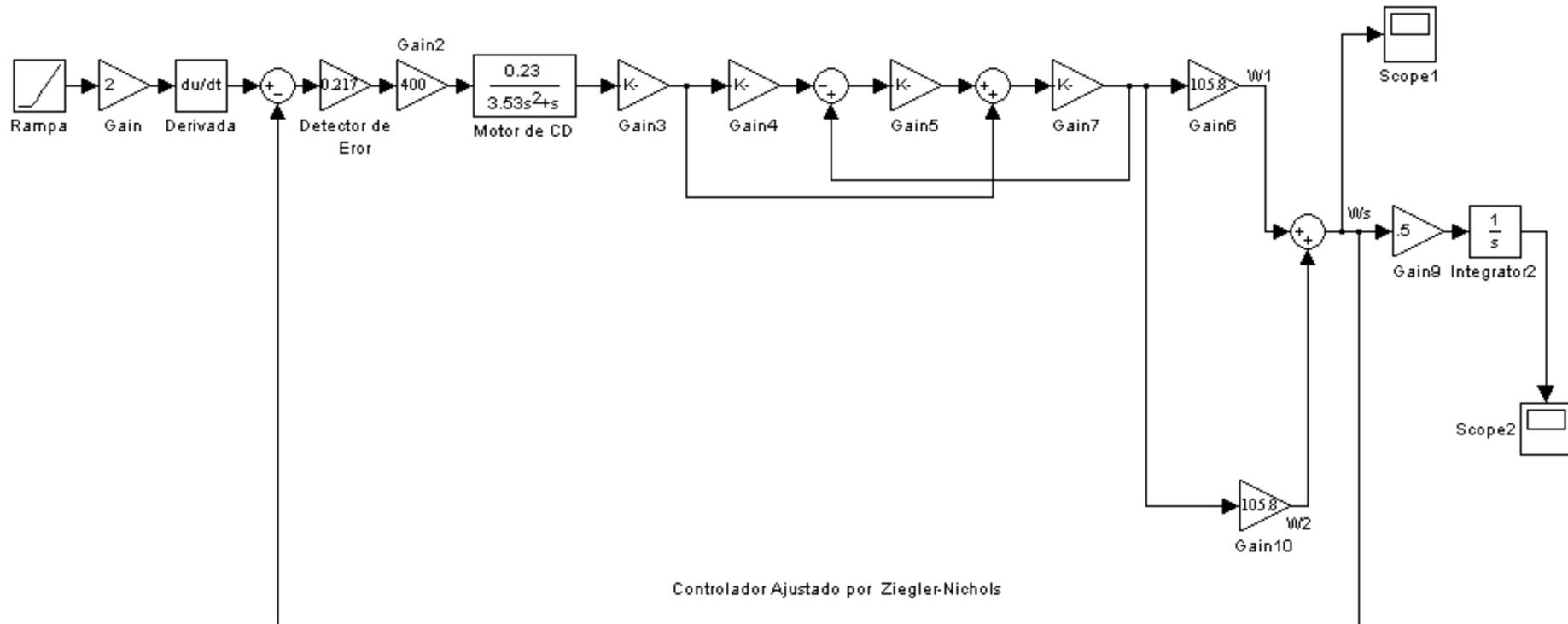
1. [www.censolar.es](http://www.censolar.es)
2. [www.energíasolar.com](http://www.energíasolar.com)
3. [www.iter.es.com](http://www.iter.es.com)
4. [www.rnw.nl.com](http://www.rnw.nl.com)
5. [www.mysolar.com](http://www.mysolar.com)

# ANEXOS

**ANEXO 1**

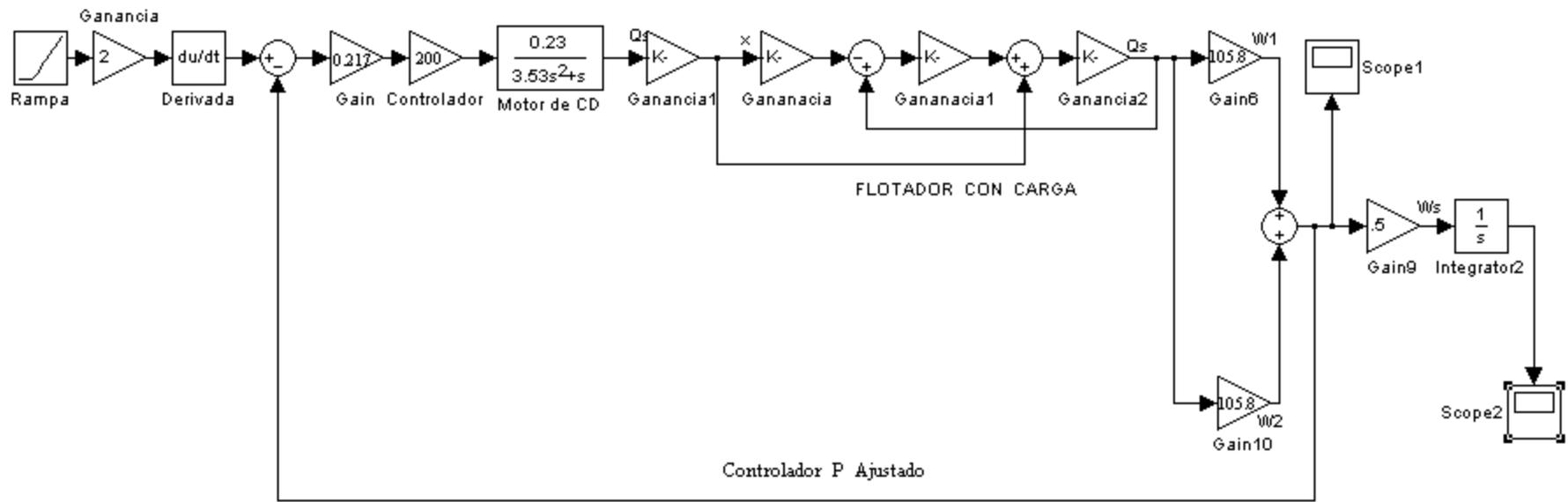
**DIAGRAMAS EN SIMULINK DEL SISTEMA CON DIFERENTES ACCIONES DE CONTROL**

**Ajuste I**



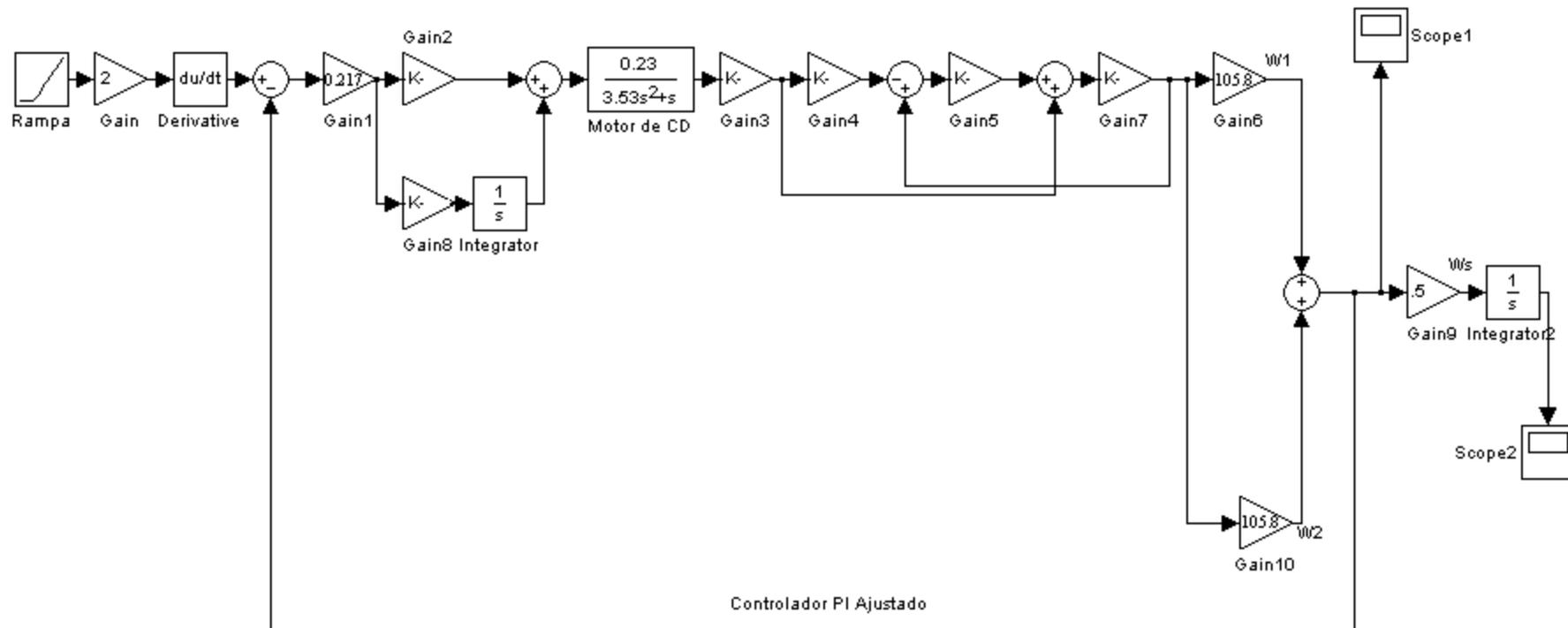
**Ajuste óptimo del controlador por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols.**

**Ajuste II**



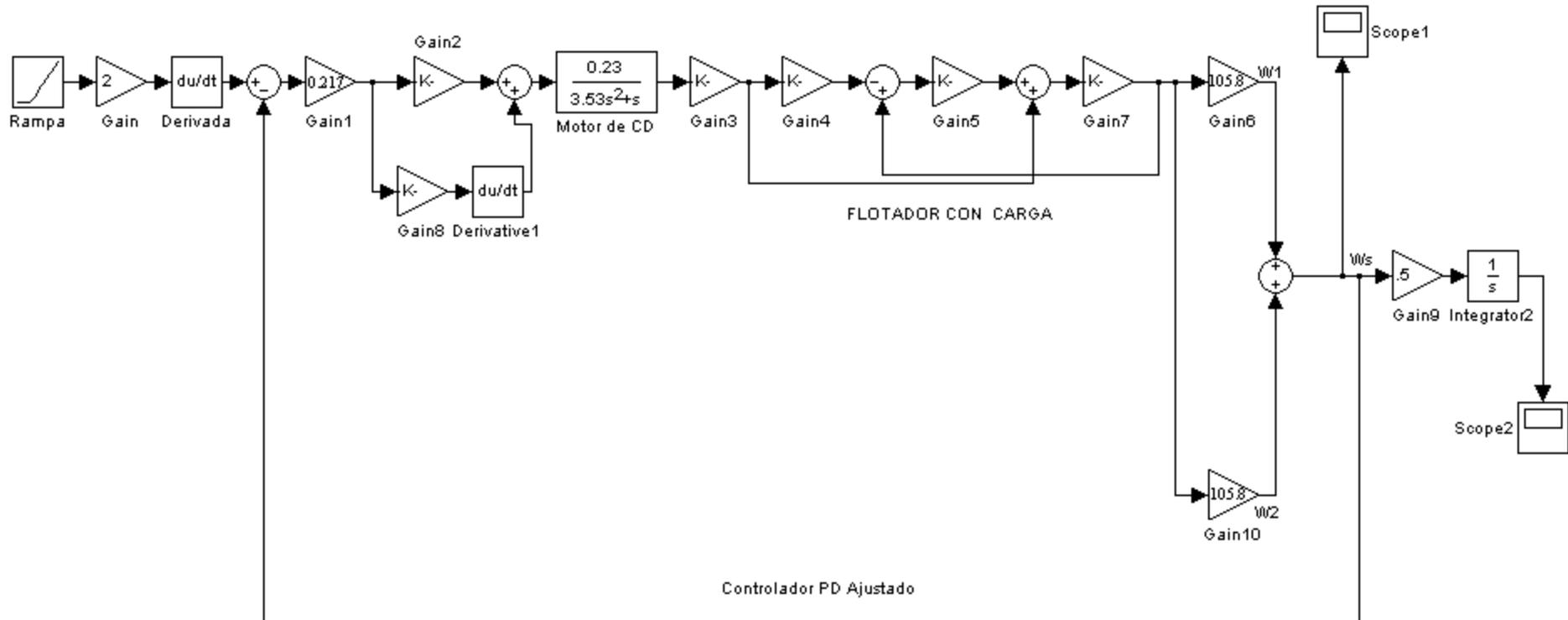
**Ajuste óptimo del controlador P por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols.**

**Ajuste III**



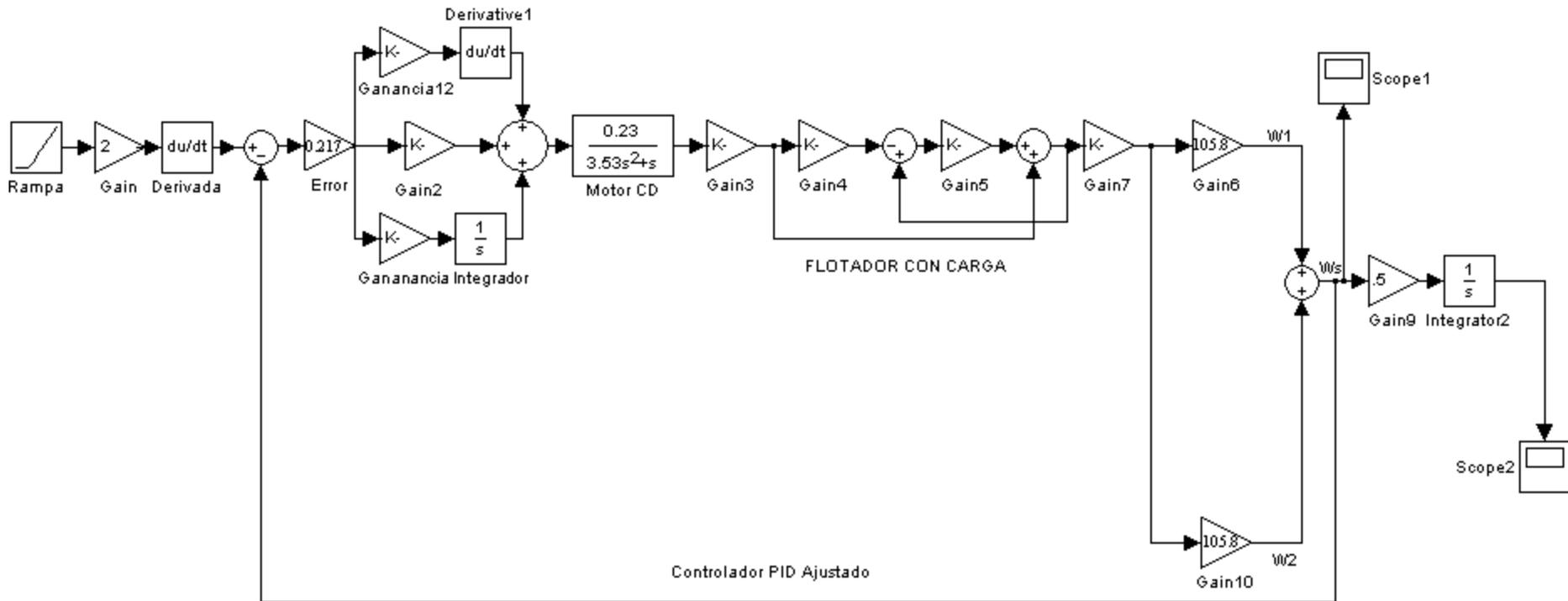
**Ajuste óptimo del controlador PI por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols.**

**Ajuste IV**



**Ajuste óptimo del controlador PD por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols.**

**Ajuste V**



**Ajuste óptimo del controlador PID por el método de las oscilaciones mantenidas de Ziegler-Nichols.**

**ANEXO 2**  
**DATOS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LOJA**

**Tabla 2.1 Variación de la irradiancia total máxima**

		<b>E</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
GM maxima	W / m <sup>2</sup>	643,63	649,84	660,86	691,55	704,09	635,45	663,83	721,68	707,40	719,81	768,56	752,56
GMpromedio	W / m <sup>2</sup>	561,97	578,50	598,38	582,41	599,46	555,24	599,70	623,33	625,55	656,58	672,00	643,68
Gmmínima	W / m <sup>2</sup>	467,72	493,79	510,19	526,41	513,44	421,84	518,23	527,48	490,26	592,87	577,08	579,23

**Tabla 2.2 Variación de la Irradiancia máxima directa promedio mensual**

		<b>E</b>	<b>F</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>J</b>	<b>J</b>	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>D</b>
GbM max	W / m <sup>2</sup>	425,04	423,04	423,93	475,72	496,44	437,14	451,00	502,60	486,63	489,02	548,45	537,03
GbM prom	W / m <sup>2</sup>	336,71	346,62	358,53	355,38	378,85	350,90	379,00	393,94	395,34	421,19	437,47	412,92
GbM min	W / m <sup>2</sup>	239,95	259,67	261,74	297,17	283,25	209,94	292,55	291,00	257,81	348,76	339,47	340,74