

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y  
Mecatrónica

Control y Simulación de Plantas Termosolares

Autor: Pablo Jesús Gómez García

Tutor: Eduardo Fernández Camacho

Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica

# **Control y Simulación de Plantas Termosolares**

Autor:

Pablo Jesús Gómez García

Tutor:

Eduardo Fernández Camacho

Catedrático de Universidad

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado: Control y Simulación de Plantas Termosolares

Autor: Pablo Jesús Gómez García

Tutor: Eduardo Fernández Camacho

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

A mi familia que siempre supieron cómo motivarme para que no me rindiera y a mis amigos y compañeros de clase que me ayudaron y apoyaron en todo lo posible. Agradecimiento especial también a Eduardo que me supo transmitir la motivación y el interés necesarios para profundizar en esta línea de investigación.

*Pablo Jesús Gómez García*

*Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica*

*Sevilla, 2016*





El objetivo de este proyecto es simular y controlar una planta termosolar utilizando diferentes estrategias de control en un modelo de la planta Acurex. Después, los resultados de las simulaciones serán analizados y se propondrán mejoras para corregir los problemas con la dinámica de la planta. Además, se hará una investigación de los avances en el sistema de extracción de energía de la planta y de las estrategias de control, buscando optimizar la obtención de energía eléctrica.



# Abstract

---

The aim of this project is to simulate and control a thermosolar plant using different control strategies in a model of the ACUREX plant. Later, the results of the simulations will be analyzed and improvements will be proposed to correct problems with the changing plant dynamics. In addition, it will be made a research of advances in the power extraction system and the control strategies looking for optimizing the production of electric energy.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Índice</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivos</i>	1
1.2 <i>Desarrollo de la energía solar</i>	1
<b>2 Estado del arte: Tecnologías Solares</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Tecnologías de concentración</i>	5
2.2 <i>Tecnologías fotovoltaicas</i>	8
<b>3 Descripción de la planta ACUREX</b>	<b>11</b>
<b>4 Modelado de la planta solar</b>	<b>13</b>
4.1 <i>Modelo de parámetros concentrados</i>	13
4.2 <i>Modelo de parámetros distribuidos</i>	14
4.3 <i>Simulación del modelo de parámetros distribuidos</i>	16
<b>5 Técnicas de control básicas</b>	<b>19</b>
5.1 <i>Control PI con parámetros fijos</i>	19
5.2 <i>Control FeedForward</i>	20
5.2.1 <i>Compensación FeedForward en serie</i>	20
5.2.2 <i>Compensación FeedForward en paralelo</i>	22
<b>6 Sistema de extracción de energía</b>	<b>25</b>
6.1 <i>Generador automático de consignas</i>	28
6.2 <i>Almacenamiento de energía térmica</i>	29
<b>7 Técnicas de control avanzadas aplicadas en la planta</b>	<b>31</b>
7.1 <i>Controladores adaptativos</i>	31
7.2 <i>Gain Scheduling</i>	32
<b>8 Líneas futuras de trabajo y conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>Referencias</b>	<b>37</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1 Vista aérea de las plantas Solacor 1 y 2 en El Carpio (Córdoba) (cortesía de Abengoa Solar)	2
Figura 1-2 Planta solar de torre Gemasolar en Fuentes de Andalucía (Sevilla) (cortesía de Torresol Energy)	2
Figura 2-1 Concentración de rayos solares en tubo central de colector cilindro-parabólico (cortesía de Abengoa Solar)	5
Figura 2-2 Campo de colectores cilindro-parabólicos (cortesía de educamevial.files.wordpress.com)	6
Figura 2-3 Planta termosolar de torre PS10 (cortesía de Microsiervos)	6
Figura 2-4 Esquema de planta solar térmica de torre central (cortesía de <a href="http://digitalgroup.info/wordpress">http://digitalgroup.info/wordpress</a> )	7
Figura 2-5 Campo de discos solares Stirling situado en Villarobledo (Albacete) (cortesía de Ecología Verde)	7
Figura 2-6 Colector Tipo Fresnel (cortesía de OPEX ENERGY)	8
Figura 2-7 Planta de paneles fotovoltaicos en Chile (cortesía de ENERGÍA 12)	9
Figura 2-8 Característica I-V y P-V de una celda fotovoltaica extraída de la librería SimPowerSystem de Matlab-Simulink	9
Figura 3-1 Campo de colectores distribuidos ACUREX de PSA (cortesía de PSA)	11
Figura 3-2 Esquema del campo solar ACUREX de PSA (cortesía de [14])	11
Figura 4-1 Simulación día de alta radiación con modelo de parámetros distribuidos	16
Figura 4-2 Simulación de día de baja radiación con modelo de parámetros distribuidos	17
Figura 5-1 Respuesta del modelo con controlador PI con parámetros fijos	19
Figura 5-2 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI con parámetros fijos	20
Figura 5-3 Esquema compensación FeedForward en serie (cortesía de [1])	21
Figura 5-4 Respuesta del modelo con controlador PI + compensación FeedForward en serie	21
Figura 5-5 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI + compensación FeedForward en serie	22
Figura 5-6 Esquema compensación FeedForward en paralelo (cortesía de [1])	22
Figura 5-7 Respuesta del modelo con controlador PI + compensación FeedForward en paralelo	23
Figura 5-8 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI + compensación FeedForward en paralelo	23
Figura 6-1 Potencia térmica extraída del campo de colectores en función del tiempo	26
Figura 6-2 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI + compensación FeedForward en serie en un día soleado con nubes puntuales	26
Figura 6-3 Potencia térmica extraída del campo de colectores en función del tiempo en un día con nubes puntuales	27
Figura 6-4 Potencia térmica y eléctrica extraída del campo de colectores en función del tiempo	27
Figura 6-5 Esquema de control de la planta ACUREX con el Generador Automático de consignas incorporado (cortesía de [2]).	28
Figura 6-6 Esquema de planta termosolar con tanques de almacenamiento de energía térmica (cortesía de	

<a href="https://www.emaze.com">https://www.emaze.com</a> )	29
Figura 7-1 Esquema de control adaptativo aplicado a la planta ACUREX (cortesía de [1])	31
Figura 7-2 Esquema básico de controlador con estrategia Gain Scheduling (cortesía de [1])	33







# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Objetivos

El objetivo de este proyecto es realizar el modelado y simulación de la planta experimental ACUREX, situada en la PSA de Almería, e implementar en este modelo diferentes técnicas de control de la temperatura de salida del fluido. Además, con los resultados obtenidos y los trabajos previos hechos en la planta se pretende realizar un estudio teórico de estrategias de control más avanzadas para ver las ventajas que añaden estas técnicas.

El trabajo se encuentra estructurado en cuatro partes:

- En primer lugar, se describe el estado del arte de las tecnologías solares existentes, la planta ACUREX y el estado de la misma.
- Después, se realiza el modelado y simulación de la planta a partir de los modelos matemáticos obtenidos del balance de energía del colector. Sobre este modelo se implementan técnicas de control clásico y se pone de manifiesto la necesidad del control en adelante para realizar el rechazo a perturbaciones.
- Tras esto, se realizan funciones encargadas de calcular la potencia térmica y la potencia eléctrica extraídas de la planta. Se profundiza en los problemas de la extracción debido a la dinámica variante de la planta, proponiéndose soluciones actuales a estos problemas.
- Por último, se introducen los conceptos básicos de técnicas de control avanzadas aplicadas a la planta en trabajos anteriores. Se resaltan las ventajas que aportan estas técnicas a los resultados finales con respecto a los resultados obtenidos.

## 1.2 Desarrollo de la energía solar

Gran parte de la motivación para realizar este trabajo se debe al auge de las energías renovables en todo el mundo y más concretamente en Andalucía. El interés en el desarrollo de las energías renovables producido por el gran aumento del precio petróleo, se prolongó debido a la necesidad de reducir el alto impacto ambiental de los combustibles fósiles. Solucionar este problema es una de las principales metas del ser humano para garantizar la sostenibilidad del planeta.

En cuanto a las energías renovables más maduras destacan la energía eólica y la energía solar. En el caso de la energía solar, se puede obtener a partir de un recurso natural en abundancia, como es el sol, que tiene contaminación baja. El potencial de aprovechamiento es mayor en lugares donde el número de horas con radiación solar sea elevado y existan altos niveles de radiación solar, como es el caso de España, y más concretamente Andalucía.

En Andalucía se han construido muchas plantas termosolares en los últimos años, como por ejemplo PS10 y PS20 en Sanlúcar la Mayor (Sevilla). Estas plantas solares de torre fueron construidas por la empresa Abengoa y tienen una capacidad para producir 11 y 20 MW respectivamente. Otras centrales solares térmicas instaladas en Andalucía utilizan la tecnología de colectores cilindro-

parabólicos. Algunas de estas plantas son Solacor 1, Solacor 2 o Solnova. Siendo las dos primeras de la provincia de Córdoba y la tercera de Sevilla, las tres son capaces de producir 50MW cada una.



Figura 1-1 Vista aérea de las plantas Solacor 1 y 2 en El Carpio (Córdoba) (cortesía de Abengoa Solar)

Otra de las ventajas de este tipo de energía es la capacidad de almacenamiento mediante el uso de tanques con sales fundidas. Esta ventaja hace que este tipo de energía sea gestionable, es decir, que la planta puede proporcionar energía si existe demanda aunque sea de noche o las condiciones de insolación sean malas debido a la nubosidad. Una de las plantas que tienen esta tecnología es la planta Gemasolar de Torresol Energy. Esta planta, de 20 MW de potencia, puede producir energía eléctrica durante 15 horas sin sol.



Figura 1-2 Planta solar de torre Gemasolar en Fuentes de Andalucía (Sevilla) (cortesía de Torresol Energy)

Tal como se ha detallado, la energía termosolar tiene un papel clave en Andalucía. Esto favorece la economía de la comunidad, generando puestos de trabajos directos e indirectos. Además, el gran potencial existente en Andalucía hace que sea un lugar apetecible donde invertir para muchas empresas. Sin embargo, en la actualidad no se aprovecha totalmente este potencial debido al todavía elevado coste de producción y a la no disponibilidad del recurso siempre que se quiere. Una de las soluciones adoptadas para conseguir tener más disponibilidad del recurso es el almacenamiento de energía visto anteriormente.

En otra línea de investigación, la reducción de los costes de producción se conseguiría mediante la optimización del funcionamiento de los procesos para maximizar la producción de energía eléctrica. Las innovaciones en los sistemas de control implementados en las plantas consiguen mejoras en el funcionamiento e importantes ahorros. Sobre esta línea se basa este proyecto y muchos de los trabajos realizados sobre plantas experimentales como ACUREX, siendo objetivo prioritario optimizar cada vez más la extracción de energía para seguir manteniendo a España como una de las grandes potencias del sector y aumentar el desarrollo de este sector para favorecer la economía y el medio ambiente.



## 2 ESTADO DEL ARTE: TECNOLOGÍAS SOLARES

La preocupación entorno a las energías renovables y el desarrollo de estas tecnologías ha hecho que el aprovechamiento de la energía solar sea cada vez más rentable. De esta forma, la energía solar se ha convertido en uno de los pilares de las energías renovables en todo el mundo.

Según el principio físico en el que se basan, las tecnologías solares pueden clasificarse en fotovoltaicas o de concentración. Hoy día existe un gran avance en ambos grupos, llegando a considerarse una tecnología madura dentro de las energías renovables, sobre todo en España.

### 2.1 Tecnologías de concentración

Esta tecnología se basa en la concentración de la energía solar, en forma de radiación, en un receptor para convertir esta energía en energía térmica calentando un fluido térmico. En estas plantas solares se recoge la energía solar mediante espejos, como colectores cilindro-parabólicos, o heliostatos y se concentra la energía solar recogida en receptores como tubos o receptores de torre. En estos receptores la energía se transmite a un fluido térmico con alta capacidad calorífica. Posteriormente, este fluido se utilizará para la producción de energía eléctrica mediante la generación de vapor y el uso de una turbina de vapor o para un proceso como la desalinización del agua marina.

En la actualidad existen 4 tecnologías viables de concentración:

- **Colectores cilindro-parabólicos:** Estas plantas se componen de lazos o hileras de espejos de forma parabólica que concentran la radiación solar en un tubo colector central por el que circula un aceite térmico, que lo calienta para alcanzar una temperatura bastante alta, entorno a los 300-400°. Este aceite es bombeado a través de intercambiadores de calor para la producción de vapor. Con el uso de una turbina de vapor se convierte la potencia térmica obtenida en el campo de colectores a energía eléctrica.



Figura 2-1 Concentración de rayos solares en tubo central de colector cilindro-parabólico (cortesía de Abengoa Solar)



Figura 2-2 Campo de colectores cilindro-parabólicos (cortesía de educamevial.files.wordpress.com)

- **Plantas solares de torre o receptor central:** Estas plantas están compuestas por un campo de heliostatos encargados de realizar el seguimiento del sol y reflejar la radiación solar en un receptor central situado en la torre. En el receptor existe un fluido térmico que se calienta y se usa para la generación de energía eléctrica mediante procesos similares a los utilizados en las plantas de colectores cilindro-parabólicos.



Figura 2-3 Planta termosolar de torre PS10 (cortesía de Microsiervos)



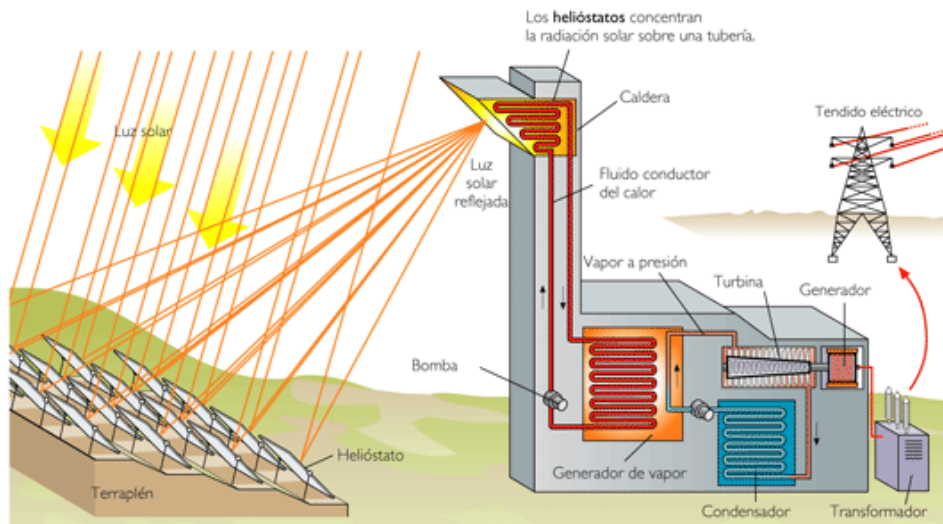


Figura 2-4 Esquema de planta solar térmica de torre central (cortesía de <http://digitalgroup.info/wordpress>)

- **Discos Solares Stirling:** Los sistemas solares de concentración de disco parabólico concentran todos los rayos incidentes sobre su superficie en un solo punto posicionado en el punto focal, que es el receptor. En este receptor se suele colocar un motor Stirling que consigue la conversión a energía eléctrica. En el receptor se alcanzan temperaturas muy altas, entorno a los 750 °C.



Figura 2-5 Campo de discos solares Stirling situado en Villarobledo (Albacete) (cortesía de Ecología Verde)

- **Colectores lineales tipo Fresnel:** Estas plantas se componen de hileras de espejos delgados que concentran la radiación solar en un tubo situado en el punto focal de los espejos por el que circula un fluido térmico, posteriormente usado para la generación de energía eléctrica. Aunque la base de este tipo de colectores es muy similar a la idea planteada en los colectores cilindro-parabólicos, este tipo de colectores tienen una serie de ventajas con respecto a los cilindro parabólicos:
  - Existe un único receptor focal por lo que se ahorra bastante en costes.
  - Más simplicidad en el diseño de los espejos.

- Menor coste de mantenimiento.

Sin embargo, este tipo de tecnología tiene un menor rendimiento.



Figura 2-6 Colector Tipo Fresnel (cortesía de OPEX ENERGY)

Hoy día, sólo las plantas de torre y las basadas en colectores son tecnologías suficientemente probadas y maduras para ser ampliamente implantadas a nivel comercial en el mundo. Las plantas solares basadas en discos Stirling necesitan un mayor desarrollo tecnológico y una mayor investigación en la materia para terminar de ser competitivas.

También se ha de destacar que todas estas plantas solares conllevan un gran gasto inicial debido a la gran inversión en terreno para situar los colectores. Conforme se va avanzando en este tipo de tecnologías se van disminuyendo costes asociados a la instalación, mantenimiento y diseño de los colectores por lo que se espera que un futuro el número de plantas termosolares vaya aumentando.

## 2.2 Tecnologías fotovoltaicas

Utilizar paneles fotovoltaicos es otra forma de conseguir la energía eléctrica a partir de la energía proveniente del sol. Los paneles fotovoltaicos se basan en el efecto fotoeléctrico para conseguir convertir la energía solar en energía eléctrica.



Figura 2-7 Planta de paneles fotovoltaicos en Chile (cortesía de ENERGÍA 12)

Cada uno de estos paneles está compuesto por celdas que producen poca energía por separado, por lo que es conveniente conectar las celdas para crear un array y poder satisfacer las demandas de un hogar o una empresa. Mediante la conexión en serie de las celdas se ajusta el voltaje del array de celdas y mediante la conexión en paralelo se ajusta la intensidad, de esta forma se puede conseguir trabajar entorno a unos valores de intensidad y tensión adecuados.

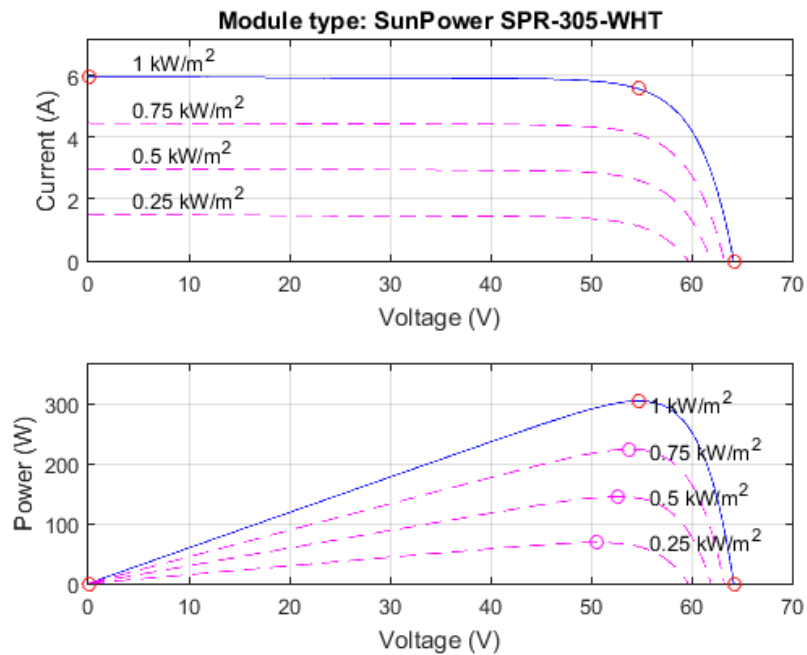


Figura 2-8 Característica I-V y P-V de una celda fotovoltaica extraída de la librería SimPowerSystem de Matlab-Simulink

Las curvas de intensidad-tensión de estas celdas, como las vistas en la Figura 2-8, muestran el punto de máxima potencia (MPP) donde se debería trabajar según la radiación solar directa sobre el panel. El alcance de dicho punto es uno de los problemas de control aplicados a esta tecnología. Los algoritmos MPPT son los encargados de hacer que se trabaje entorno a este punto.

En el caso de que los paneles fotovoltaicos dispusieran de suficientes grados de libertad como para realizar un seguimiento de la trayectoria solar en cada instante, éste sería otro problema de control. Mediante el seguimiento de la trayectoria del sol se consigue una mayor eficiencia de los paneles.



### 3 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA ACUREX

El campo de colectores cilindro-parabólicos ACUREX se trata de un banco de pruebas de la Plataforma Solar de Almería (PSA). Tal como se describió en el apartado anterior, la tecnología de colectores cilindro-parabólicos se basa en la concentración de la energía solar en los tubos receptores centrales de los colectores. El objetivo de esta planta experimental es realizar ensayos de control de la temperatura del aceite térmico que se encuentra en el interior de los tubos.



Figura 3-1 Campo de colectores distribuidos ACUREX de PSA (cortesía de PSA)

El fluido que circula por los tubos receptores es un aceite térmico con alta capacidad calorífica que puede trabajar entorno a los 300-400 °C. Este aceite se encarga de transportar la energía calorífica obtenida en el lazo de colectores hacia el generador de vapor.

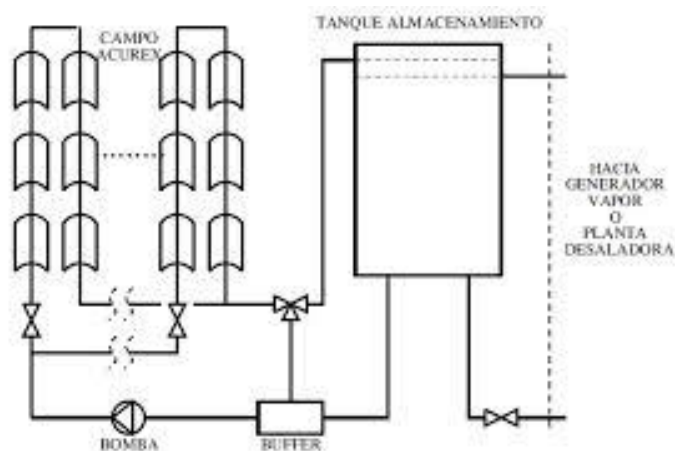


Figura 3-2 Esquema del campo solar ACUREX de PSA (cortesía de [14])

El campo consta de 10 lazos de colectores, teniendo cada lazo 48 colectores dispuestos en serie. Cada lazo tiene 142 metros de parte activa y 30 metros de parte pasiva, en total cada lazo tiene 172 metros. La parte pasiva del lazo corresponde con la unión de los colectores por lo que no se encarga de reflejar la radiación solar.

En cuanto al caudal de aceite que circula por las tuberías, se debe tener en cuenta que el caudal máximo que puede circular por el campo solar es 12 L/s, mientras que el caudal mínimo es 2 L/s, valor que viene impuesto por la degradación del aceite. Suponiendo un equilibrado perfecto entre los lazos, el caudal máximo en cada lazo de colectores es 1.2 L/s y el caudal mínimo 0.2 L/s. A la hora de la simulación del lazo de colectores estos valores serán muy importantes para saturar la salida de los controladores.

# 4 MODELADO DE LA PLANTA SOLAR

---

En este capítulo se describen los modelos matemáticos del lazo de colectores cilindro-parabólicos desarrollados en este trabajo. Los modelos que se han desarrollado son:

- Modelo de parámetros concentrados.
- Modelo de parámetros distribuidos.

En el desarrollo del proyecto se eligió el modelo de parámetros distribuidos para la simulación del lazo de colectores ya que este modelo tiene en cuenta gran parte de la dinámica no lineal de la planta y es mucho más detallado que el modelo de parámetros concentrados. Sin embargo, la simpleza que aporta el modelo de parámetros concentrados y su buena respuesta en régimen permanente hace que se utilice este modelo para desarrollar controladores en adelante, FeedForward.

## 4.1 Modelo de parámetros concentrados

Este modelo se trata de un modelo simplificado de la planta. En él se realiza la suposición de que la temperatura del fluido y la del metal son iguales en régimen permanente. Esta suposición simplifica en gran manera el modelo y permite obtener una buena aproximación, disminuyendo la complejidad de programación de otros modelos más detallados como el de parámetros distribuidos. Así pues, este modelo sólo tiene en cuenta la temperatura de entrada y salida del fluido, el caudal y la temperatura ambiente, obviando la temperatura del metal. El modelo tiene la siguiente expresión:

$$C \frac{dT_{out}(t)}{dt} = n_o SI(t) - P_{cp} q(t) (T_{out}(t) - T_{in}(t)) - H_l (T_m(t) - T_a(t))$$

(4-1)

Donde:

- $C$  es la capacidad térmica ( $J/kg^{\circ}C$ ).
- $t$  es el tiempo (s)
- $T_{out}$  es la temperatura de salida del fluido, aceite ( $^{\circ}C$ ).
- $n_o$  es la eficiencia óptica del colector.
- $S$  es la superficie del campo ( $m^2$ ).
- $I$  es la irradiancia ( $W/m^2$ ).
- $P_{cp}$  es un parámetro que tiene en cuenta variables propias del modelo y que es dependiente de la temperatura.
- $q$  representa el caudal del fluido, aceite ( $m^3/s$ ).
- $T_{in}$  representa la temperatura de entrada del fluido al lazo de colectores ( $^{\circ}C$ ).

- $H_l$  es un coeficiente de pérdidas ( $W/m^2\text{°C}$ ).
- $T_m$  es la temperatura media del fluido ( $\text{°C}$ ).
- $T_a$  es la temperatura ambiente ( $\text{°C}$ ).

La gran importancia de este modelo en el proyecto se debe al diseño de controladores FeedForward a partir de él. Esto se debe a la buena respuesta del modelo en régimen permanente. Los coeficientes existentes en el controlador FeedForward pueden obtenerse experimentalmente en la planta. [1]

## 4.2 Modelo de parámetros distribuidos

El modelo de parámetros distribuidos se trata de un modelo mucho más detallado de cada lazo de colectores de la planta de colectores cilindro-parabólicos. Gracias a este modelo se puede obtener una respuesta transitoria y en régimen permanente muy cercana a la obtenida en la planta real. Esto hace que este modelo haya sido el más utilizado en trabajos anteriores sobre la planta experimental ACUREX. Este modelo se ha utilizado para satisfacer los siguientes objetivos sobre la planta:

- Simulación de la planta para conseguir optimizar la regulación de la temperatura de salida.
- Estudio del comportamiento de la planta ante diferentes situaciones como el paso de nubes.
- Estudio del comportamiento de la planta ante fallos forzados.
- Aplicación de los conocimientos adquiridos a plantas comerciales.

El modelo viene descrito por las siguientes ecuaciones:

$$A_m \rho_m C_m \frac{dT_m(t,l)}{dt} = n_o GI(t) - D_f \pi H_t (T_m(t,l) - T_f(t,l)) - D_m \pi H_l (T_m(t,l) - T_a(t)) \quad (4-2)$$

$$A_f \rho_f C_f \frac{dT_f(t,l)}{dt} + \rho_f C_f q(t) \frac{dT_f(t,l)}{dl} = D_f \pi H_t (T_m(t,l) - T_f(t,l)) \quad (4-3)$$

Donde el subíndice m se refiere a los parámetros del metal y el subíndice f se refiere a los parámetros del fluido:

- $C_{m,f}$  es la capacidad térmica ( $J/kg\text{°C}$ ).
- $t$  es el tiempo (s).
- $l$  es la longitud (m).
- $A_{m,f}$  es la sección transversal ( $m^2$ ).
- $\rho_{m,f}$  es la densidad ( $Kg/m^3$ ).



- $T_f$  es la temperatura del fluido, aceite ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $T_m$  es la temperatura del metal ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $n_o$  es el rendimiento global del colector.
- $G$  es la apertura del colector (m).
- $I$  es la irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).
- $D_{f,m}$  es el diámetro interior y el exterior de la tubería (m).
- $q$  representa el caudal del fluido, aceite ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $H_l$  es un coeficiente de pérdidas ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ).
- $H_t$  es el coeficiente de pérdidas convectivas ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ).

Además, se tiene como condición de contorno que la temperatura de entrada del fluido en el campo de colectores  $T_f(t,0)$  sea igual a la temperatura de entrada que tiene el aceite  $T_m(t)$ . Otra cosa a tener en cuenta es que los parámetros de este modelo variarán con la temperatura. Las expresiones de los parámetros del modelo que varían en función de la temperatura o el caudal son las siguientes:

$$\rho_f = 903 - 0.672T$$

$$C_f = 1820 + 3.478T$$

$$H_l = 0.00249\Delta T_m - 0.0613$$

$$H_v = 2.17 \cdot 10^6 - 5.01 \cdot 10^4 T + 4.53 \cdot 10^2 T^2 - 1.64 T^3 + 2.1 \cdot 10^{-3} T^4$$

$$H_t = H_v q^{0.8}$$

Para resolver las ecuaciones (4-2) y (4-3) se utilizó un algoritmo iterativo de tres etapas que implementa un modelo en diferencias finitas e integra las ecuaciones mediante el método de Euler. Mediante la implementación de este algoritmo se consigue realizar el cálculo de la temperatura del fluido (segunda etapa) y la del metal (primera etapa) en cada instante de tiempo y en cada segmento del lazo de colectores. Para la integración se tomó un segmento de 1m de longitud y un tiempo de integración de 0.25s. Por último, en la tercera etapa, la temperatura del fluido es corregida considerando la energía neta transportada por el fluido.

Etapa 1:

$$T_m(k, n) = T_m(k-1, n) + \frac{\Delta t}{A_m \rho_m C_m} \left( n_o G I(k) - D_f \pi H_t (T_m(k-1, n) - T_{1f}(k-1, n)) - D_m \pi H_l (T_m(k-1, n) - T_a(k)) \right)$$

Etapa 2:

$$T_f(k, n) = T_{1f}(k-1, n) + \frac{D_f \pi H_t \Delta t}{A_f \rho_f C_f} (T_m(k-1, n) - T_{1f}(k-1, n))$$

Etapa 3:

$$T_{1f}(k,n) = T_f(k,n) - \frac{q(k)\Delta t}{A_f \Delta l} (T_f(k,n) - T_f(k,n-1))$$

En estas ecuaciones  $k$  representa el intervalo de tiempo y  $n$  el segmento del lazo. Cabe destacar que las ecuaciones que modelan el comportamiento de un elemento pasivo del lazo de colectores son exactamente iguales a las anteriores excepto que la radiación solar en estos elementos es nula y las pérdidas son menores. En la simulación del modelo se hace la diferenciación entre elementos pasivos y activos para aplicar las ecuaciones correctas.

### 4.3 Simulación del modelo de parámetros distribuidos

Se realizaron simulaciones con días de baja y alta radiación para comprobar el comportamiento del modelo de parámetros distribuidos.

- Día de alta radiación:

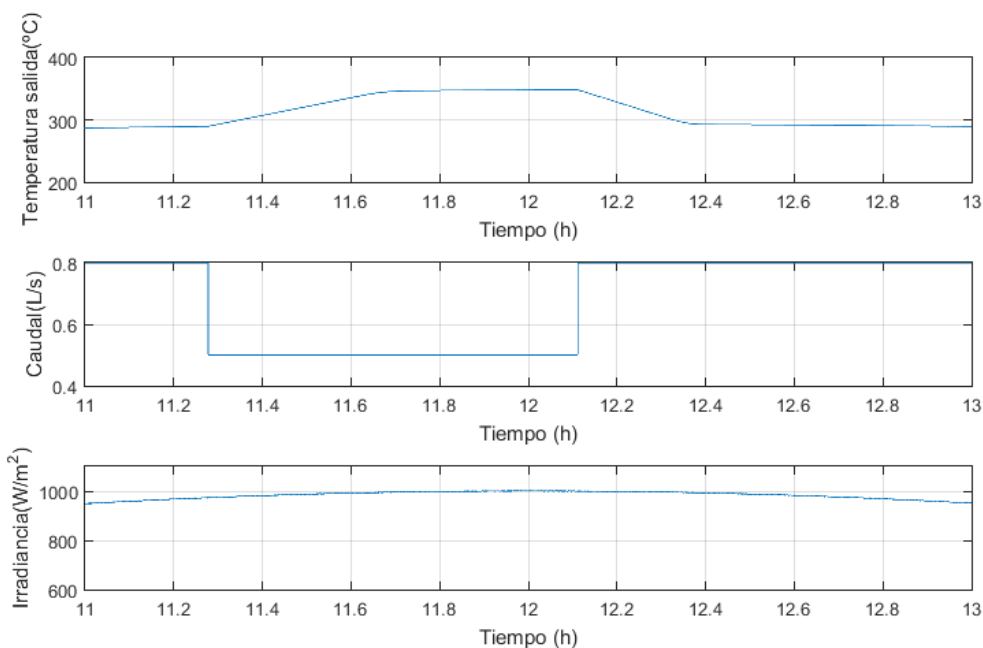


Figura 4-1 Simulación día de alta radiación con modelo de parámetros distribuidos

- Día de baja radiación:

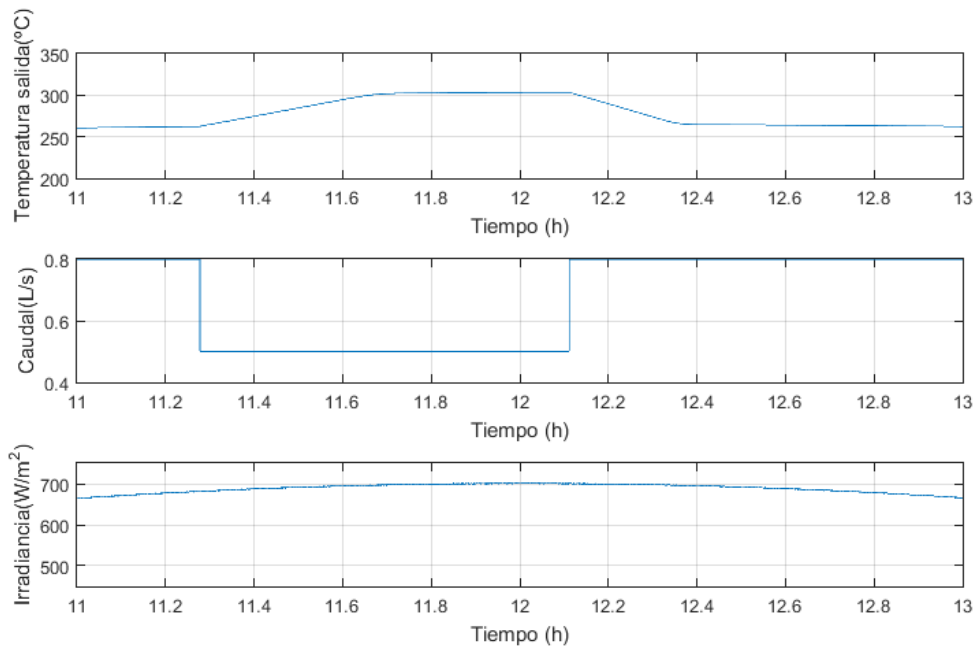


Figura 4-2 Simulación de día de baja radiación con modelo de parámetros distribuidos

Aunque sea más difícil de programar que el de parámetros concentrados, el modelo de parámetros distribuidos es muy bueno a la hora de la simulación ya que contiene en gran detalle la dinámica de la planta. Esto hace que la simulación sea bastante realista.

En los resultados se puede observar la alta no linealidad de la planta. Además, el punto de funcionamiento se encuentra en constante cambio ya que depende de la radiación solar en cada instante. Debido a esto, el diseño de un controlador FeedForward será necesario. Para el diseño de este controlador se hará uso del modelo de parámetros concentrados visto en la ecuación (4-1).

En adelante, para la simulación del lazo de colectores cilindro-parabólicos se utilizará el modelo de parámetros distribuidos ya que contiene menos simplificaciones y se ajusta de una forma realista al comportamiento de la planta.



# 5 TÉCNICAS DE CONTROL BÁSICAS

En este apartado del trabajo se detallan las técnicas de control básicas utilizadas en la simulación del modelo de parámetros distribuidos de la planta de colectores cilindro-parabólicos ACUREX. Siendo la variable a controlar el caudal de aceite y considerándose la irradiancia como una perturbación.

## 5.1 Control PI con parámetros fijos

La alta no linealidad del modelo y las variaciones en la dinámica debidas a los cambios de las condiciones de operación, el rango de funcionamiento de caudal amplio y las constantes variaciones de la radiación solar, hacen que sea difícil obtener resultados satisfactorios mediante la utilización de un controlador PID cuyos parámetros sean fijos.

Se realizaron simulaciones con este tipo de controlador y se obtuvieron los siguientes resultados:

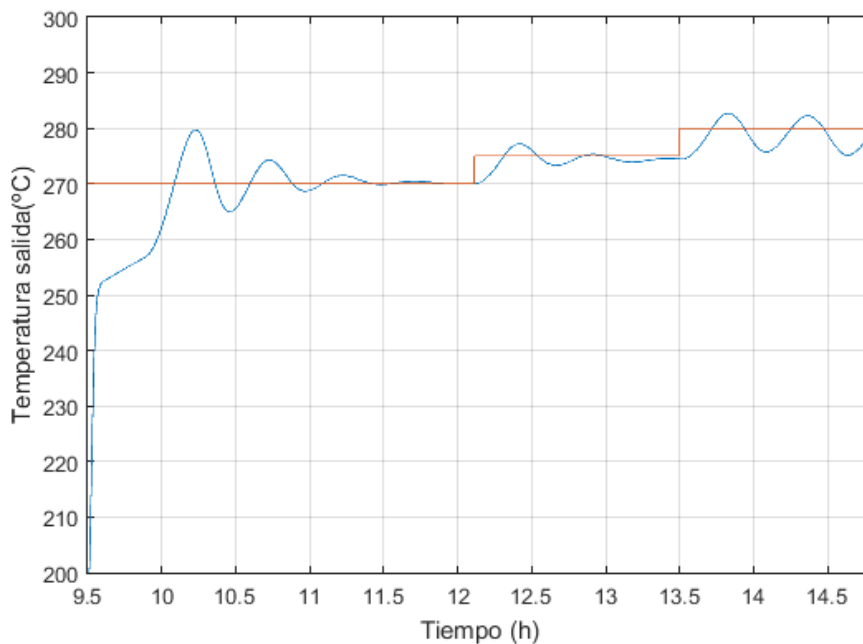


Figura 5-1 Respuesta del modelo con controlador PI con parámetros fijos

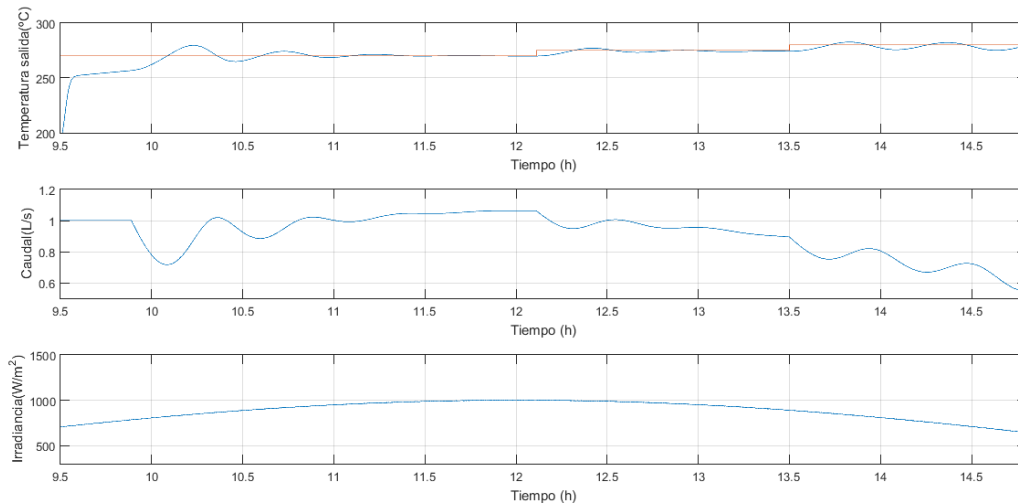


Figura 5-2 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI con parámetros fijos

En ambas figuras se puede apreciar como las variaciones en la dinámica del sistema hacen que el comportamiento del controlador PI se vaya degradando y la respuesta sea cada vez peor. Queda de manifiesto la necesidad de añadir un sistema que compense el efecto de las perturbaciones, un controlador FeedForward.

## 5.2 Control FeedForward

Los controladores FeedForward son ampliamente utilizados en la industria para corregir las perturbaciones medibles. El FeedForward medirá las perturbaciones existentes para actuar en caso de que alguna perturbación cambie y calcular la señal de control necesaria para mantener el set point. En conclusión, el FeedForward se encargará de medir las variaciones en la irradiancia, la temperatura de entrada al campo de colectores, la temperatura ambiente y en la reflectividad de los espejos y calcular a partir de estas mediciones la señal de control.

Tal como se avanzó en el apartado 4 de esta memoria, para el diseño del controlador FeedForward se utilizará la ecuación (4-1), es decir, el modelo de parámetros concentrados.

Se realizarán dos esquemas de control:

- PI+FeedForward en serie
- PI+FeedForward en paralelo

### 5.2.1 Compensación FeedForward en serie

El esquema de la compensación FeedForward en serie es el siguiente:

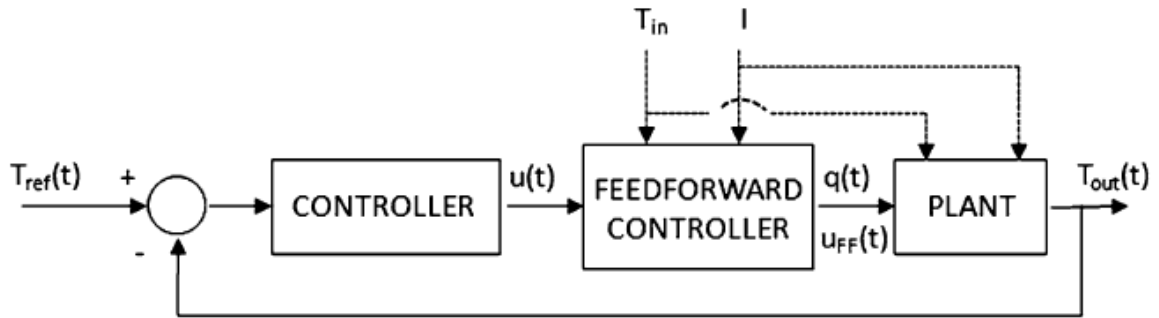


Figura 5-3 Esquema compensación FeedForward en serie (cortesía de [1])

La salida del FeedForward en serie proporciona la señal de control  $q(t) = u_{FF}(t)$ . La variable  $u(t)$  es la salida del controlador y será utilizada en el cálculo de la señal de control. El cálculo de la señal de control se realiza mediante la siguiente expresión:

$$u_{FF}(t) = \frac{0.7869I - 0.485(u(t) - 151.5) - 80.7}{u(t) - T_{in}(t)}$$

Cabe destacar que esta ecuación se trata de la ecuación (4-1) en la que se han estimado los parámetros de forma experimental en la planta ACUREX.

En la simulación se debe tener en cuenta que el controlador FeedForward tendrá un tiempo de muestreo de 39s, al igual que el controlador PI. Además, como se está simulando un lazo de colectores únicamente, la salida del controlador FeedForward debe ser debidamente escalada. Los resultados obtenidos en la simulación son los siguientes:

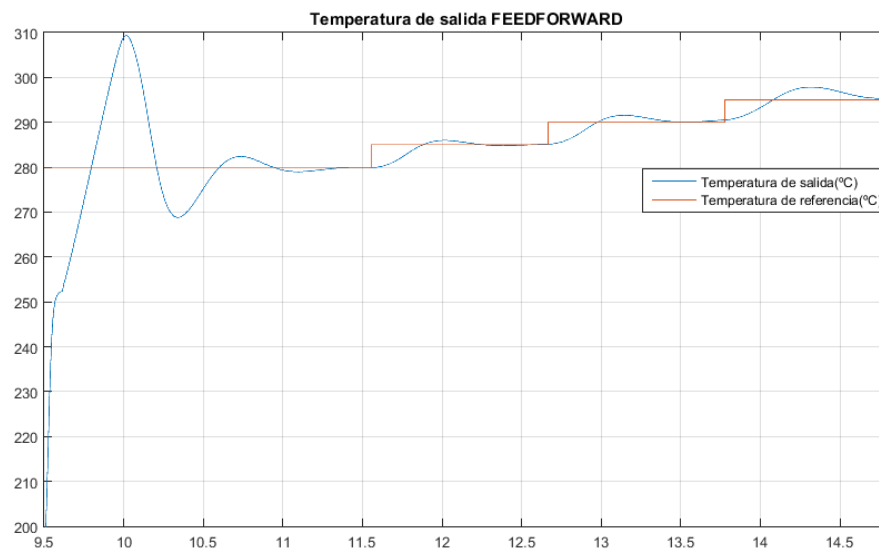


Figura 5-4 Respuesta del modelo con controlador PI + compensación FeedForward en serie

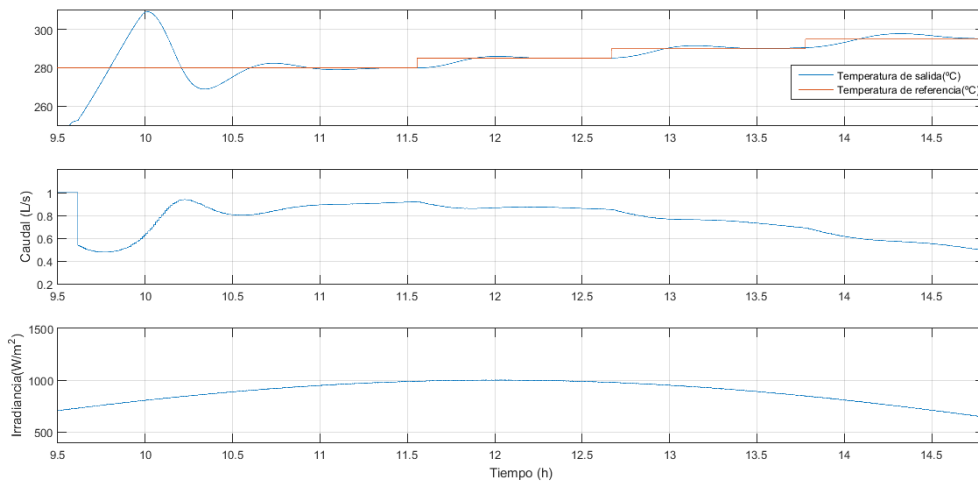


Figura 5-5 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI + compensación FeedForward en serie

Tanto en la Figura 5-4 como en la Figura 5-5 se puede observar como el FeedForward en serie proporciona la compensación deseada ante perturbaciones. El comportamiento del controlador es bastante bueno, sin embargo, se aprecia que en diferentes puntos de funcionamiento el controlador PI funciona peor que en el punto de funcionamiento en el que se ha diseñado, existe un aumento de la sobreoscilación.

La inclusión del compensador FeedForward en serie proporciona una linealización del sistema lo cual es bastante beneficioso para la implementación de otras técnicas de control más avanzadas.

### 5.2.2 Compensación FeedForward en paralelo

El esquema de la compensación FeedForward en paralelo es el siguiente:

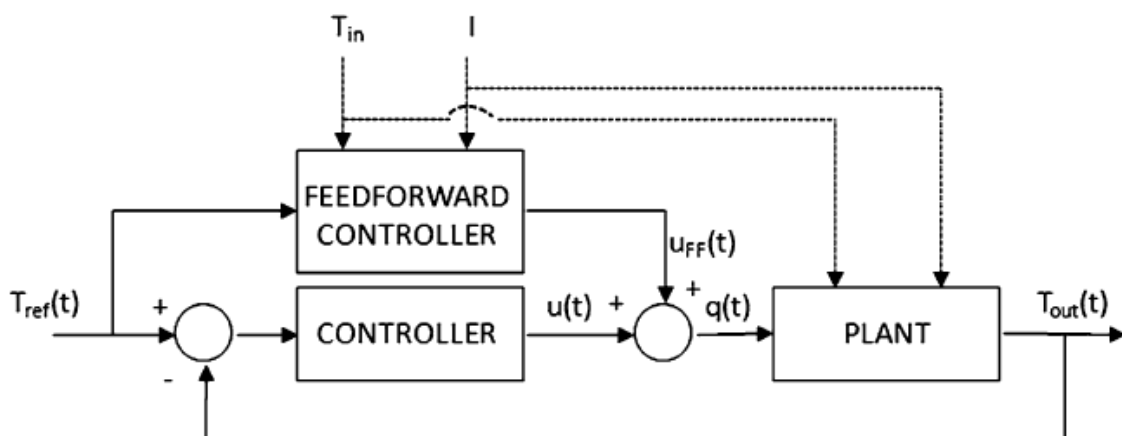


Figura 5-6 Esquema compensación FeedForward en paralelo (cortesía de [1])



La salida del FeedForward en paralelo proporciona la señal de control necesaria para tener la temperatura de referencia demandada y  $q(t) = u_{FF}(t) + u(t)$ . El cálculo de la señal de control del FeedForward se realiza mediante la siguiente expresión:

$$u_{FF}(t) = \frac{0.7869I - 0.485(T_{ref}(t) - 151.5) - 80.7}{T_{ref}(t) - T_{in}(t)}$$

Cabe destacar que al igual que en el caso en serie, esta ecuación se trata de la ecuación (4-1) en la que se han estimado los parámetros de forma experimental en la planta ACUREX.

A la hora de la simulación de este controlador se toman las mismas medidas que en el caso en serie. Los resultados obtenidos en la simulación son los siguientes:

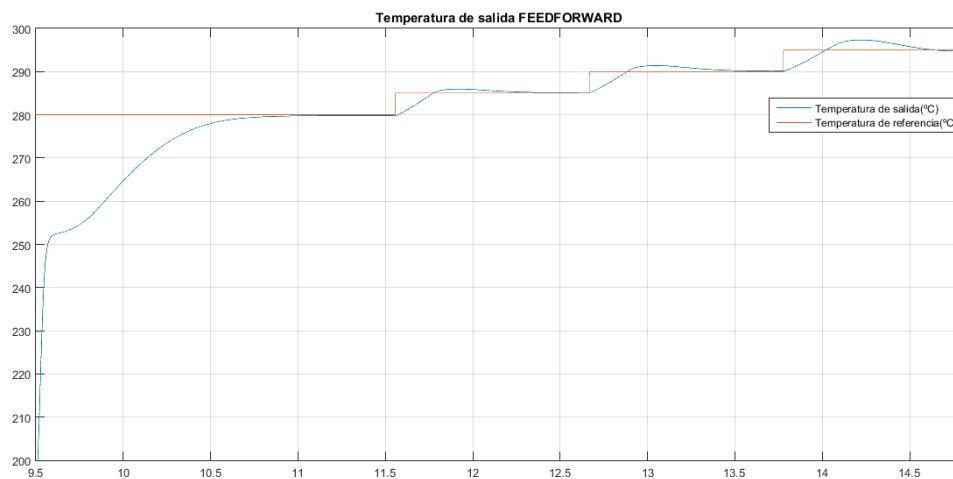


Figura 5-7 Respuesta del modelo con controlador PI + compensación FeedForward en paralelo

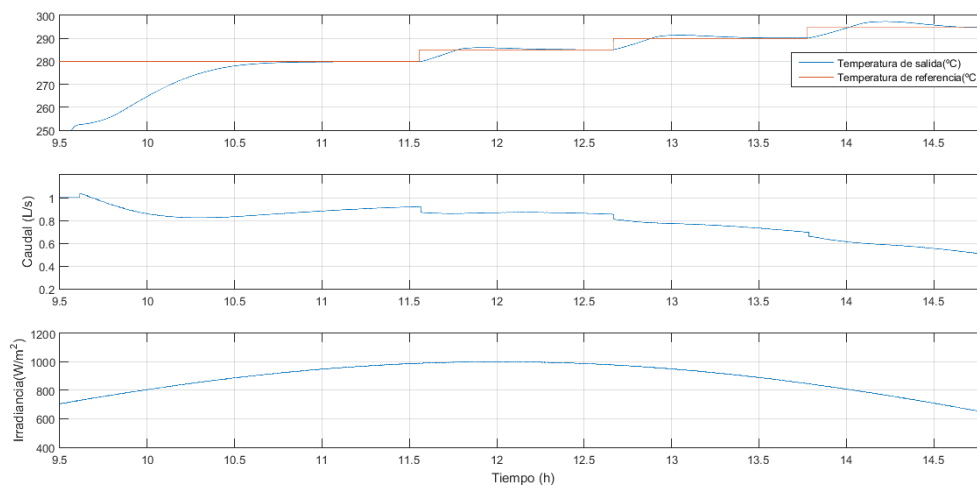


Figura 5-8 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI + compensación

### FeedForward en paralelo

La inclusión del compensador FeedForward en paralelo proporciona una buena respuesta del sistema al igual que con el FeedForward en serie. Además, los tiempos de respuesta obtenidos son bastante buenos.

A modo de conclusión, se puede afirmar que en sistemas cuya dinámica varía a lo largo de su rango de funcionamiento y/o en aquellos que sufren perturbaciones, la inclusión de un controlador en adelanto tipo FeedForward proporciona grandes beneficios a la hora de rechazar las perturbaciones y ajustar la señal de control. La comparación entre la Figura 5-1 y la Figura 5-4 y la Figura 5-7 muestra como la inclusión del FeedForward mejora bastante el comportamiento del modelo. Aún así, los controladores PI diseñados en los esquemas de compensación en serie y en paralelo siguen teniendo limitaciones ya que no trabajan igual en cualquier punto de funcionamiento. Debido a esto, se puede deducir que la utilización de otros algoritmos de control complementarios al FeedForward como el Control Adaptativo, el Gain Scheduling o el Control Predictivo pueden proporcionar grandes beneficios a la hora de maximizar la eficiencia de la planta.

## 6 SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

---

En este apartado del trabajo se profundiza en la extracción y gestión de la potencia obtenida por el campo de colectores. Al final del lazo de colectores existe un tanque de almacenamiento del aceite (ver Figura 3-2). Una vez allí, el aceite térmico es utilizado para producir energía eléctrica mediante un generador de vapor o para la desalinización del agua marina. Es importante saber la cantidad de potencia térmica que se obtiene del campo de colectores por lo que se utiliza la siguiente expresión para su cálculo:

$$P_T = C_f \rho_f q \Delta T = C_f \rho_f q (T_{out} - T_{in})$$

(6-1)

Donde:

- $P_T$  es la potencia térmica del fluido (Wt).
- $C_f$  es la capacidad térmica del fluido (J/kg°C).
- $\rho_f$  es la densidad el fluido (Kg/m<sup>3</sup>).
- $q$  representa el caudal del fluido, aceite (m<sup>3</sup>/s).
- $T_{out}$  es la temperatura de salida del fluido, aceite (°C).
- $T_{in}$  es la temperatura de entrada del fluido, aceite (°C).

Cabe destacar que para el cálculo de la potencia térmica mediante la ecuación (6-1) se supone que el equilibrado de caudal entre los 10 lazos de colectores es perfecto y que todos lazos se controlan para que tengan la misma temperatura.

Suponiendo que el propósito comercial de la planta es la producción eléctrica, una vez obtenido el valor de la potencia térmica, el siguiente paso para la extracción de energía eléctrica es el generador de vapor. En el generador de vapor se calienta el agua de una caldera mediante el calor gracias al aceite térmico. Este vapor mueve una turbina para la generación de energía eléctrica.

En el modelo desarrollado de la planta se ha incluido este sistema de extracción de potencia mediante funciones encargadas de realizar el cálculo de la potencia térmica en cada instante y de la extracción de potencia eléctrica.

La función encargada del cálculo de la potencia térmica en cada instante contiene la ecuación (6-1). Esta función tendrá como restricción que si la temperatura a la salida del lazo de colectores es menor que la temperatura a la entrada (típico del arranque de la planta) la potencia térmica extraída será nula. Mediante la simulación hecha con esta función para el modelo de la planta con controlador PI + FeedForward en serie se obtuvo el siguiente resultado:

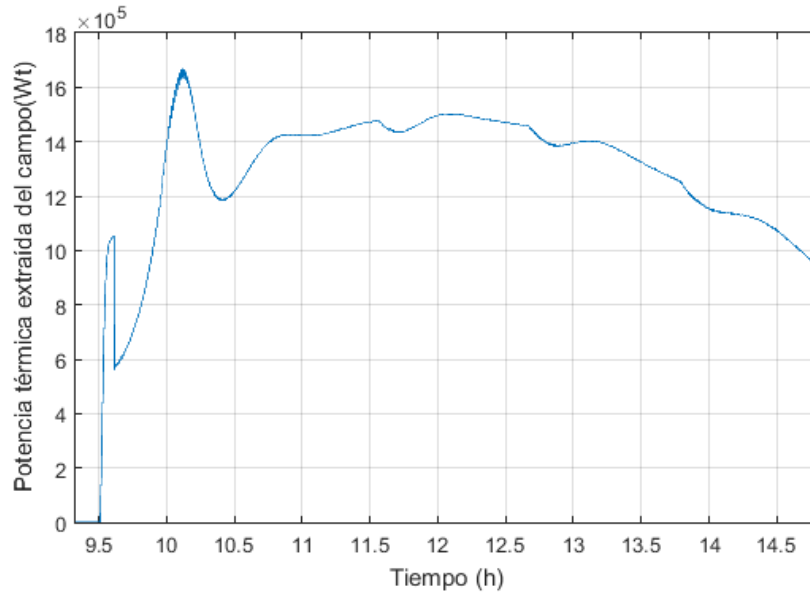


Figura 6-1 Potencia térmica extraída del campo de colectores en función del tiempo

Tras analizar los resultados obtenidos en la Figura 6-1 junto con los obtenidos en la Figura 5-5, se puede concluir que la extracción de potencia térmica depende claramente del caudal circulante por el campo. Este hecho puede afectar a la extracción de energía ya que en días donde la insolación sea baja el caudal será bajo y se podrá extraer poca energía. El mismo problema existe cuando es de noche. Este efecto se ha simulado y se puede apreciar en las siguientes figuras:

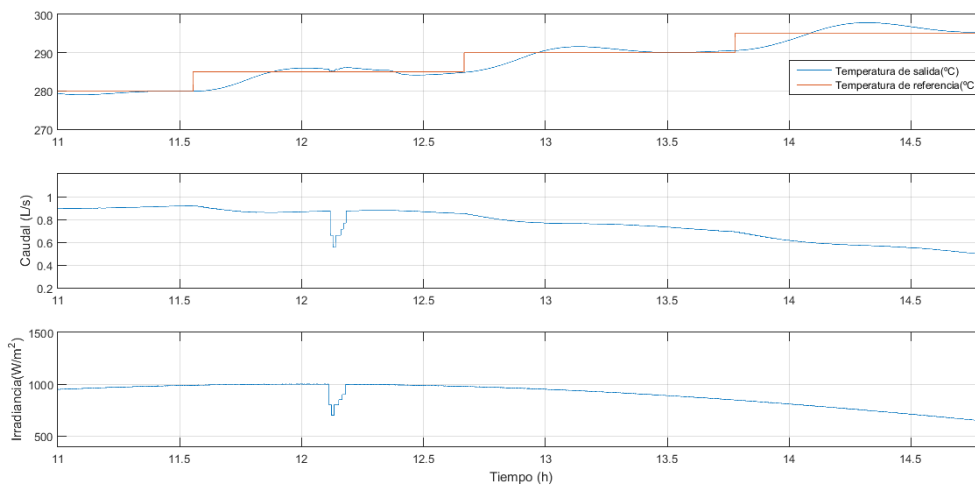


Figura 6-2 Respuesta del modelo y evolución del caudal con controlador PI + compensación FeedForward en serie en un día soleado con nubes puntuales

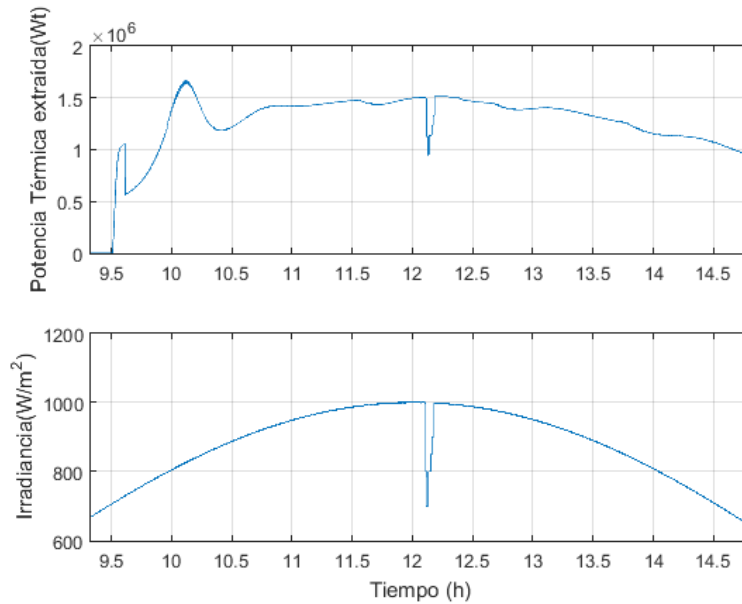


Figura 6-3 Potencia térmica extraída del campo de colectores en función del tiempo en un día con con nubes puntuales

Por otra parte, la función encargada de realizar la conversión de potencia térmica en potencia eléctrica contiene un rendimiento del ciclo de conversión y unas pérdidas asociadas al ciclo que dependen de la temperatura del aceite. Cuanto mayor sea la temperatura del aceite a la salida del campo de colectores, mayor será el rendimiento del sistema de conversión. Sin embargo, cuanto mayor sea la temperatura, mayores pérdidas habrá en el proceso. Todas estas restricciones han sido tenidas en cuenta en la función. Mediante la simulación hecha con esta función para el modelo de la planta con controlador PI + FeedForward en serie se obtuvo el siguiente resultado:

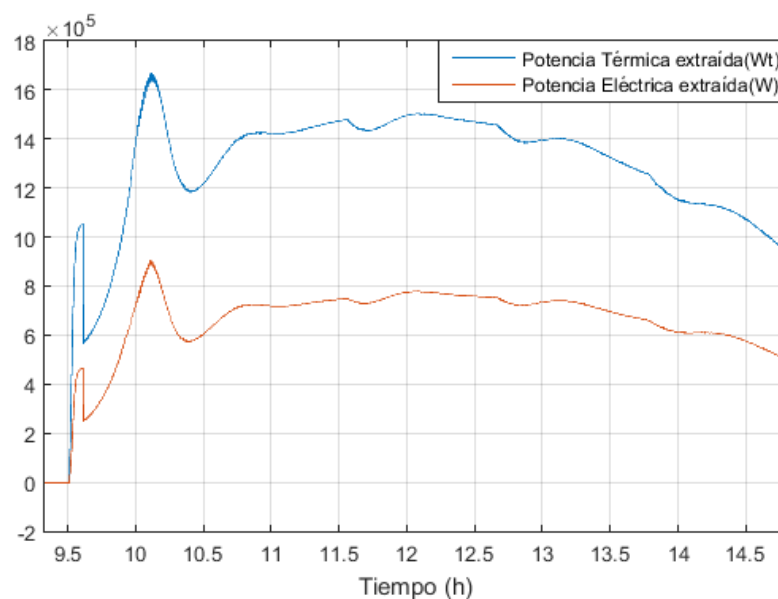


Figura 6-4 Potencia térmica y eléctrica extraída del campo de colectores en función del tiempo

Al igual que con la potencia térmica, la extracción de potencia eléctrica está ligada al caudal de aceite del campo de colectores por lo que un día desfavorable en cuanto a insolación afecta bastante a la extracción de energía.

Las innovaciones tecnológicas han avanzado mucho para solucionar este problema típico en la operación de plantas termosolares. Algunas de estas innovaciones son:

- Generador automático de consignas
- Almacenamiento de energía térmica

## 6.1 Generador automático de consignas

El objetivo de todos los controladores anteriormente diseñados es conseguir un buen seguimiento de la referencia de temperatura impuesta. Esta referencia se fija para captar la máxima potencia posible de la planta. Conocer el valor de la referencia de temperatura que se debe imponer no es un tema trivial y es clave a la hora de conseguir maximizar la potencia obtenida. De nada vale tener un controlador con buenas prestaciones si la referencia que se asigna al controlador no es la óptima ya que no se consigue trabajar en el punto de máxima eficiencia energética en cada instante.

El diseño de un generador automático de consignas consigue paliar este problema. El generador se encarga de realizar los cálculos necesarios para establecer el valor de la temperatura de referencia de forma que sea el valor que proporcione la máxima energía en las condiciones ambientales existentes. Además, se le pueden añadir restricciones de operación, consiguiendo que la planta opere de forma más segura.

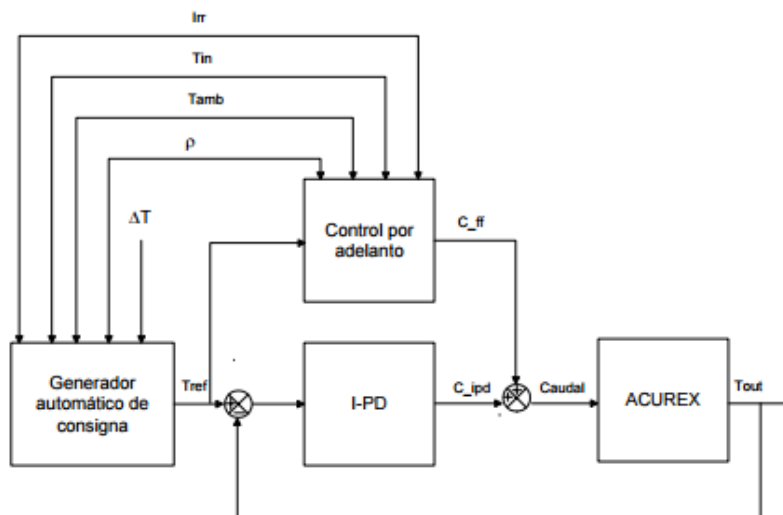


Figura 6-5 Esquema de control de la planta ACUREX con el Generador Automático de consignas incorporado (cortesía de [2]).

Este generador ha sido probado experimentalmente en la planta consiguiéndose resultados satisfactorios, tal como se exponen en [2]. Se consiguió que la planta operase de forma segura mientras se extraía la mayor cantidad de energía posible.

## 6.2 Almacenamiento de energía térmica

Anteriormente en el capítulo 1 de esta memoria ya se mencionó el uso de esta tecnología, poniendo como ejemplo la planta Gemasolar de Torresol Energy. Esta tecnología está evolucionando en los últimos tiempos ya que aporta una mayor gestionabilidad y flexibilidad a la planta. Esto ofrece muchas ventajas económicas ya que la planta es capaz de abastecer energía a demandas nocturnas o en días donde la insolación está siendo baja, solucionando problemas como los encontrados en la Figura 6-3.

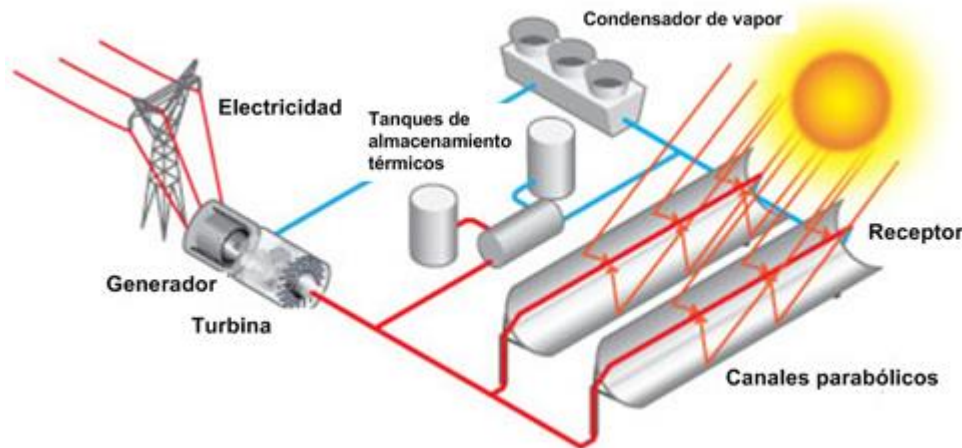


Figura 6-6 Esquema de planta termosolar con tanques de almacenamiento de energía térmica (cortesía de <https://www.emaze.com>)

El método más utilizado para el almacenamiento de energía térmica es el almacenamiento mediante sales fundidas.





# 7 TÉCNICAS DE CONTROL AVANZADAS APLICADAS EN LA PLANTA

Al igual que se han realizado avances en los sistemas de extracción de potencia, se han realizado muchos avances en cuanto a estrategias de control. Las técnicas de control avanzadas fueron implementadas en plantas experimentales como ACUREX con la intención de tener en cuenta las variaciones de la dinámica de la planta y las condiciones especiales de funcionamiento de ésta.

En el apartado 5 de la memoria se pudo comprobar que los controladores de la familia PID con parámetros fijos no tenían buena respuesta debido a los cambios de las condiciones de trabajo de la planta. La solución a este problema fue la inclusión de un compensador FeedForward, sin embargo, tal como se comentó en el correspondiente apartado, la respuesta del controlador junto con el FeedForward también se iba degradando conforme las variaciones en la dinámica eran mayores.

El diseño de técnicas de control avanzadas que tuvieran como objetivo tener en cuenta esta dinámica cambiante de la planta y las condiciones en las que debe funcionar una planta termosolar se hizo necesario.

Técnicas como los controladores adaptativos o el Gain Scheduling añadidas a técnicas basadas en modelo han mejorado bastante las prestaciones de estos controladores.

## 7.1 Controladores adaptativos

Una de las ideas para conseguir cumplir este objetivo es el diseño de controladores adaptativos. Los controladores adaptativos se ajustan a las circunstancias del proceso, de esta forma no sufren los cambios en la dinámica del sistema y consiguen que la respuesta del sistema no varíe en función de las condiciones de funcionamiento.

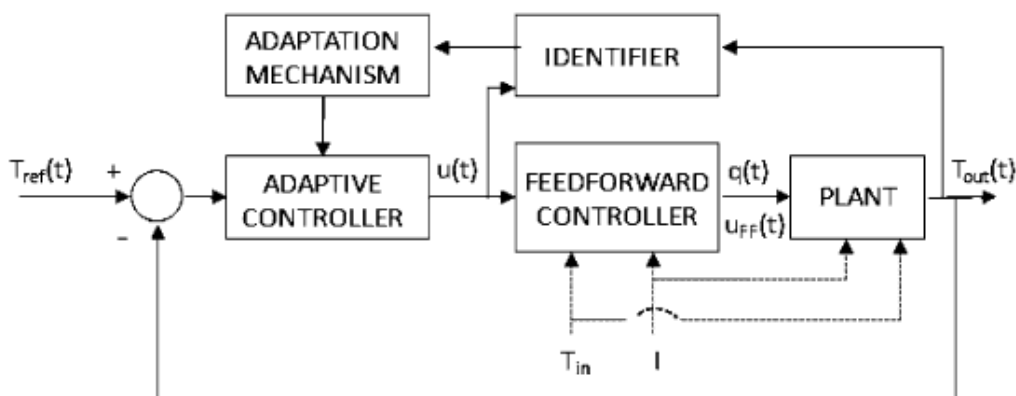


Figura 7-1 Esquema de control adaptativo aplicado a la planta ACUREX (cortesía de [1])

De la Figura 7-1 se puede observar que el controlador adaptativo tiene un mecanismo de adaptación según las condiciones de la planta. El identificador se encarga de obtener un modelo de la planta mediante la medición de los valores de entrada y salida de la misma, en el caso de la planta ACUREX se obtiene un modelo de planta + FeedForward en serie. Por tanto, la estrategia de control adaptativo realiza las siguientes tareas:

- Estimación de un modelo lineal a partir de los valores de entrada y salida del sistema planta + FeedForward mediante el identificador.
- Ajuste del controlador, teniendo en cuenta los valores estimados del modelo.
- Cálculo de la variable de control.
- Supervisión de la respuesta de la planta.

Este tipo de estrategia se ha llevado a cabo en algunos tipos de controladores como:

- Controlador PI
- GPC

Existen muchos trabajos y libros en los que se exponen los resultados de estas técnicas como *Advanced Control of Solar Plants* [1] o *Control Adaptativo y Robusto* [3]. En todos ellos se destacan las mejoras obtenidas mediante el uso de esta estrategia de control. Las buenas respuestas obtenidas mediante el uso de controladores convencionales se han mejorado, además, el rango donde el funcionamiento de estos controladores también ha mejorado.

## 7.2 Gain Scheduling

Gain Scheduling es una técnica de control no lineal basada en el diseño de diferentes tipos de controladores lineales para diferentes condiciones de operación del proceso. Toda esta familia de controladores diseñados se encuentra a la espera de que el *Scheduler* (planificador) determine qué controlador debe estar activo. El Scheduler se encarga de supervisar la planta y medir las condiciones de funcionamiento en las que se encuentra. Según estas condiciones, el Scheduler decidirá cuál es el controlador diseñado que mejor se adapta a las condiciones existentes. En el caso de existir una situación intermedia entre diferentes controladores, se realiza una ponderación de la acción de los controladores para conseguir así una respuesta ponderada y que consiga una respuesta efectiva para cada tipo de situación.

De la definición anterior se puede concluir que la técnica del Gain Scheduling tiene una idea similar a la idea del control adaptativo. Ambas estrategias adaptan el control según las condiciones de funcionamiento. El esquema de un controlador con estrategia Gain Scheduling es el siguiente:

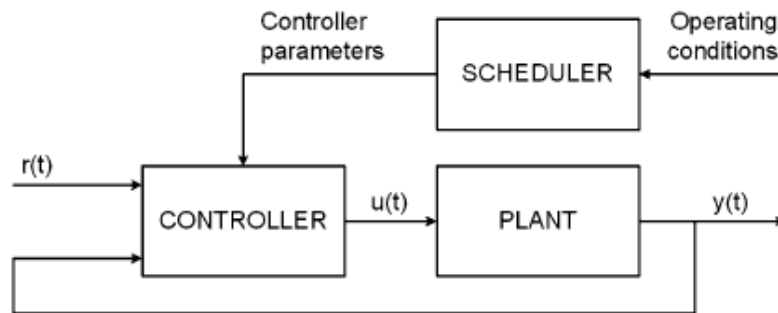


Figura 7-2 Esquema básico de controlador con estrategia Gain Scheduling (cortesía de [1])

Existen muchos trabajos y libros en los que se exponen los resultados de estas técnicas como *Advanced Control of Solar Plants* [1]. En todos ellos se destacan las mejoras obtenidas mediante el uso de esta estrategia de control. Las buenas respuestas obtenidas mediante el uso de controladores convencionales se han mejorado, además, el rango donde el funcionamiento de estos controladores también ha mejorado debido a la adaptación hecha en el Gain Scheduling.



# 8 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO Y CONCLUSIONES

---

Tal como se expuso en la introducción, el desarrollo de las plantas termosolares está creciendo, no sólo en Andalucía sino en todo el mundo. Este desarrollo lleva ligado las innovaciones tecnológicas hechas en cuanto al control de la planta y la optimización de la obtención de la energía. Por tanto, se debe esperar que tanto la tecnología solar como las líneas de investigación abiertas para maximizar las prestaciones de la planta sigan creciendo y evolucionando. Tanto las nuevas técnicas de control diseñadas para maximizar la energía extraída como el desarrollo de sistemas de extracción que hacen a la planta más eficiente y gestionable suponen un gran avance y suponen un importante ahorro económico para las empresas. Muchos de estos avances ya fueron probados en plantas comerciales teniendo gran éxito ya que el coste de adaptar la planta a ellos se amortizó al poco tiempo y pronto se obtuvieron beneficios.

Con estos antecedentes se puede suponer que existirán muchas líneas futuras de investigación destinadas a mejorar cada vez más la tecnología existente. Además, todo el desarrollo en este ámbito aporta fiabilidad en el sector, lo que puede suponer un aumento de puestos de trabajo y de riqueza a la población.

Este trabajo ha reflejado la importancia de este desarrollo, partiendo desde la introducción de la materia, realizando simulaciones con diferentes estrategias de control sobre un modelo de la planta ACUREX, analizando los resultados para obtener conclusiones y decidir las ventajas de cada estrategia, investigando los sistemas de extracción de potencia y las mejoras que se les pueden añadir, y, por último, profundizando en técnicas de control avanzadas que mejoran los resultados obtenidos en la planta.

Particularizando en el trabajo realizado, se considera satisfactorio hasta el punto alcanzado, pudiéndose proseguir el trabajo añadiendo nuevos algoritmos de control como Control Predictivo o Control Adaptativo a la simulación del lazo de colectores.



# REFERENCIAS

---

- [1] E. F. Camacho, M. Berenguel, F. R. Rubio y D. Martínez, *Advanced Control of Solar Plants*, Springer, 1997.
- [2] C. Martínez, L. Valenzuela, M. Berenguel y E. F. Camacho, «ESTRUCTURA DE REGULACIÓN CON GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE CONSIGNAS Y CONTROL POR ADELANTO PARA UN CAMPO DE COLECTORES SOLARES».
- [3] F. R. Rubio y M. J. L. Sánchez, *Control Adaptativo y Robusto*, Sevilla, 1996.
- [4] ABENGOA SOLAR, [En línea]. Available: <http://www.abengoa.com/>.
- [5] Biblioteca Universidad de Sevilla, [En línea]. Available: [http://bib.us.es/estudia\\_e\\_investiga/guias/tfg](http://bib.us.es/estudia_e_investiga/guias/tfg).
- [6] PROTERMOSOLAR, [En línea]. Available: <http://www.protermosolar.com/>.
- [7] PSA, [En línea]. Available: <http://www.psa.es/es/index.php>.
- [8] TORRESOL ENERGY, [En línea]. Available: <http://www.torresolenergy.com/>.
- [9] E. F. Camacho y C. Bordons, *Model Predictive Control*, Springer.
- [10] OPEX ENERGY, [En línea]. Available: <http://opex-energy.com/termosolares/>.
- [11] MICROSIERVOS, [En línea]. Available: <http://www.microsiervos.com/>.
- [12] ECOLOGÍA VERDE, [En línea]. Available: <http://www.ecologiaverde.com/>.
- [13] ENERGÍA 12, [En línea]. Available: <https://energia12.com/>.
- [14] E. F. Camacho, M. Berenguel y F. R. Rubio, «CONTROL DE CAMPO DE COLECTORES SOLARES,» 2006.
- [15] O. Flor Unda, «CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO DEL CAMPO DE COLECTORES SOLARES TIPO ACUREX,» Trabajo Fin de Master, Universidad de Sevilla, 2013.
- [16] A. J. Sánchez del Pozo Fernández, «CONTROL PREDICTIVO DE UN LAZO DE COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS DE LA PLANTA SOLAR ACUREX (PSA),» Trabajo Fin de Master, Universidad de Sevilla, 2014.
- [17] A. J. Gallego Len, «MODELADO, IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE UN LAZO DE COLECTORES DE ENERGÍA SOLAR CON TECNOLOGÍA CILINDRO-PARABÓLICA,» Trabajo Fin de Master, Universidad de Sevilla, 2010.

- [18] E. F. Camacho, «Aumento de rendimiento en plantas termo-solares,» Trabajo presentado a la novena edición del premio a la investigación.



