



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA**

**TEMA: DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO POR
MATRIZ DINÁMICA (DMC) DE TEMPERATURA PARA UNA
CENTRAL TERMOSOLAR DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

AUTOR: RODRÍGUEZ GRANDA, ANDY ROBINSSON

DIRECTOR: ING. AYALA TACO, JAIME PAÚL PhD.

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO POR MATRIZ DINÁMICA (DMC) DE TEMPERATURA PARA UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE GENERACIÓN ELÉCTRICA” fue realizado por el señor **ANDY ROBINSSON RODRÍGUEZ GRANDA**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Febrero del 2018

ING. PAÚL AYALA, PhD

C. C: 1709434243



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ANDY ROBINSSON RODRÍGUEZ GRANDA**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO POR MATRIZ DINÁMICA (DMC) DE TEMPERATURA PARA UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE GENERACIÓN ELÉCTRICA”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, Febrero del 2018

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal dashed line. The signature is stylized and appears to read 'Andy Robinson Rodríguez Granda'.

Andy Robinson Rodríguez Granda

C.C 0604968016



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, **ANDY ROBINSSON RODRÍGUEZ GRANDA** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO POR MATRIZ DINÁMICA (DMC) DE TEMPERATURA PARA UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE GENERACIÓN ELÉCTRICA”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, Febrero del 2018

Andy Robinsson Rodríguez Granda

C.C 0604968016

DEDICATORIA

Queridos Papá , Mamá y Hermana. Les dedico el presente trabajo, gracias a su apoyo incondicional logré culminar esta meta con mucho orgullo. Les debo un eterno agradecimiento por su gran amor.

AGRADECIMIENTO

En primera instancia, agradezco a Dios por darme la vida y permitirme lograr este objetivo profesional.

Agradezco de manera especial a mi tutor, el Ing. Paúl Ayala, ya que su ayuda y orientación me han permitido culminar satisfactoriamente este trabajo de titulación.

Con todo mi amor y cariño, agradezco a mis padres, Ramiro Rodríguez y Enma Granda, por su infinito apoyo a lo largo de estos años de estudio, su sacrificio y esfuerzo ha sido una fuente de motivación, sin ustedes este momento nunca habría sido posible.

A mi hermana Evelyn, por suponer una constante ayuda, es una bendición saber que puedo contar contigo.

A mis compañeros y amigos de la Universidad, quienes siempre estuvieron dispuestos a brindar su conocimiento y ayuda durante estos años de estudio, las amanecidas y gratos momentos que vivimos los llevaré siempre en mi memoria.

Y finalmente, a mi pareja sentimental Nadia, por su tiempo y sincera ayuda en el desarrollo de este trabajo, gracias de todo corazón.

Andy Robinsson Rodríguez Granda.

Índice general

Certificación	i
Autoría de Responsabilidad	ii
Autorización	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Indice de Tablas	ix
Indice de Figuras	xi
Resumen	xv
Abstract	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2

1.3. Justificación e Importancia	3
1.4. Alcance del proyecto de fin de carrera	5
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	6
1.6. Organización del documento	6
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Antecedentes	8
2.2. Energía Solar como plan de energías renovables	11
2.3. Tecnología Solar Térmica de Concentración	13
2.4. Central Eléctrica Termosolar	15
2.4.1. Sistema Captador: Colectores Cilindro Parabólicos	18
2.4.2. Sistema Captador: Tubo Absorbente	18
2.4.3. Sistema Absorbedor: Fluido Térmico	19
2.4.4. Sistema de Almacenamiento Térmico : Tanque de Almacenamiento	19
2.4.5. Sistema de Conversión de Potencia: Intercambiador de Calor de Car-	
casa y Tubos	20
2.5. Control Predictivo basado en Modelo	20
2.5.1. Control por Matriz Dinámica	25
2.6. Conclusiones del Capítulo	31
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	32

3.1. Descripción Actual de la Planta	32
3.2. Cálculo de la Irradiancia Directa Solar	33
3.3. Modelado de la Planta Solar	39
3.3.1. Modelo de Parámetros Distribuidos	40
3.3.2. Identificación de modelo lineal de la planta solar	47
3.4. Estrategia de Control	54
3.4.1. Valor de Matriz Dinámica	55
3.4.2. Algoritmo Controlador DMC	56
3.4.3. Restricción	58
3.4.4. Parámetros de Sintonización	59
3.5. Conclusiones del Capítulo	61
4. PRUEBAS Y RESULTADOS	62
4.1. Evaluación del DMC con el Modelo Lineal de segundo orden	63
4.1.1. Evaluación de la respuesta a un escalón	63
4.1.2. Evaluación a perturbaciones externas al modelo lineal	67
4.2. Evaluación del DMC con el Modelo de parámetros distribuidos	68
4.2.1. Evaluación de la respuesta a un escalón	68
4.2.2. Simulación con perfil de radiación ASHRAE	72
4.2.3. Simulación con perturbación en al perfil de radiación ASHRAE	73
4.3. Conclusiones del Capítulo	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76

	ix
REFERENCIAS	79
ANEXOS	A.1
Anexo A. Código para la obtención de irradiancia directa con colector fijo por el método ASHRAE	A.1
Anexo B. Código simulación de CSP por parámetros distribuidos.	B.2
Anexo C. Código identificación por mínimos cuadrados.	C.3
Anexo D. Matriz dinámica G.	D.2
Anexo E. Código de simulación del modelo lineal de la planta con control DMC.	E.1
Anexo F. Código de simulación del modelo de parámetros distribuidos de la planta con control DMC.	1

Índice de tablas

Tabla 1:	<i>Ventajas y desventajas de controladores MPC.</i>	22
Tabla 2:	<i>Constantes ASHRAE para valores promedio mensual.</i>	37
Tabla 3:	<i>Valores de Irradiancia directa ASHRAE.</i>	38
Tabla 4:	<i>Valores de Irradiancia efectiva ASHRAE.</i>	40
Tabla 5:	<i>Parámetros constantes del campo de colectores de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.</i>	45
Tabla 6:	<i>Parámetros de modelo lineal de segundo orden.</i>	54
Tabla 7:	<i>Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de subida con planta lineal de segundo orden.</i>	64
Tabla 8:	<i>Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de bajada con planta lineal de segundo orden.</i>	65
Tabla 9:	<i>Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de subida con el modelo por parámetros distribuidos.</i>	69

Tabla 10: <i>Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de bajada con el modelo por parámetros distribuidos.</i>	70
---	----

Índice de figuras

Figura 1:	<i>Variación de temperatura de la Tierra respecto al valor de 1850.</i>	12
Figura 2:	<i>Tecnologías Termosolares de Concentración.</i>	13
Figura 3:	<i>Estaciones disponibles de la PSA.</i>	14
Figura 4:	<i>Instalaciones de CSP distribuidas en el mundo.</i>	15
Figura 5:	<i>Componentes de una Central Termosolar de Generación Eléctrica.</i>	16
Figura 6:	<i>Diagrama esquemático del campo de colectores solares ACUREX.</i>	17
Figura 7:	<i>Captador Cilindro Parabólico.</i>	18
Figura 8:	<i>Tubo Absorbente.</i>	19
Figura 9:	<i>Intercambiador de Calor.</i>	21
Figura 10:	<i>Estrategia MPC.</i>	23
Figura 11:	<i>Diagrama de bloques MPC.</i>	24
Figura 12:	<i>Respuesta ante escalón.</i>	25
Figura 13:	<i>Trayectoria de referencia.</i>	30
Figura 14:	<i>CSP de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.</i>	33

Figura 15: <i>Esquema del Sol y la apertura del colector.</i>	39
Figura 16: <i>Diagrama de bloques del modelo de parámetros distribuidos.</i>	44
Figura 17: <i>Temperatura de Salida de CSP con caudal constante.</i>	46
Figura 18: <i>Temperatura de Salida de CSP con perfil ASHRAE.</i>	48
Figura 19: <i>Identificación por mínimos cuadrados.</i>	50
Figura 20: <i>Respuesta de CSP a una entrada escalón.</i>	53
Figura 21: <i>Ley de Control DMC.</i>	55
Figura 22: <i>Respuesta al escalón del modelo lineal.</i>	56
Figura 23: <i>Diagrama de flujo del controlador DMC.</i>	57
Figura 24: <i>Sintonización con diferentes valores de λ.</i>	60
Figura 25: <i>Respuesta de CSP controlado a un escalón de subida con planta lineal de segundo orden.</i>	64
Figura 26: <i>Respuesta de CSP controlado a un escalón de bajada con planta lineal de segundo orden.</i>	65
Figura 27: <i>Modelo lineal de la planta con control DMC.</i>	66
Figura 28: <i>Respuesta del modelo lineal de la planta con control DMC y perturbación externa.</i>	67
Figura 29: <i>Respuesta de CSP controlado a un escalón de subida con modelo por parámetros distribuidos.</i>	69
Figura 30: <i>Respuesta de CSP controlado a un escalón de bajada con modelo por parámetros distribuidos.</i>	70

Figura 31: <i>Respuesta del modelo por parametros distribuidos de la planta con control DMC.</i>	71
Figura 32: <i>Respuesta del modelo por parámetros distribuidos de la planta con control DMC y valores de irradiancia ASHRAE.</i>	73
Figura 33: <i>Respuesta del modelo por parametros distribuidos de la planta con control DMC y valores de irradiancia ASHRAE con perturbaciones puntuales.</i>	74

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y la simulación de un controlador predictivo por matriz dinámica, para una planta termosolar con propósitos de generación eléctrica. Se realiza una síntesis de la información necesaria para el desarrollo de la investigación, desde el estudio de las diferentes tecnologías y usos de la energía solar como fuente de generación eléctrica renovable, el análisis de la incidencia solar en el país y su uso con posibilidades de generación eléctrica. Se utiliza como referencia el campo de colectores cilindro parabólicos situados en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, donde se tratan diferentes aspectos del problema de control, desde el modelado de la planta, hasta el diseño y simulación de este esquema de control. La planta presenta una dinámica compleja, por lo que se propone dos modelos basados en trabajos publicados en este ámbito. Se diseña el controlador predictivo, y el sistema controlado se simula en diferentes escenarios. Los resultados obtenidos se analizan con el objetivo de validar la estrategia de control.

Palabras clave:

- **ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.**
- **COLECTORES CILINDRO PARABÓLICOS.**
- **CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO.**
- **CONTROL POR MATRIZ DINÁMICA.**
- **DMC.**

ABSTRACT

This work presents the design and simulation of a predictive controller by dynamic matrix, for a thermosolar power generation plant. A synthesis of the information necessary for the development of the research is made, from the study of the different technologies and uses of solar energy as a source of renewable electricity generation, the analysis of the solar incidence in the country and its use with possibilities of electric generation. The parabolic trough collector field of the University of the Armed Forces ESPE is used as a reference, where different aspects of the control problem are treated, from the modeling of the plant, to the design and simulation of this control scheme. The plant presents a complex dynamic, so two models based on published works in this field are proposed. The predictive controller is designed, and the controlled system is simulated in different scenarios. The results obtained are analyzed in order to validate the control strategy.

Keywords:

- **THERMAL SOLAR ENERGY.**
- **PARABOLIC TROUGHS.**
- **MODEL PREDICTIVE CONTROL.**
- **DYNAMIC MATRIX CONTROL.**
- **DMC.**

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la actualidad el empleo de las energías renovables presenta un renovado interés en la comunidad científica y la población en general. La energía solar experimentó su primer gran impulso durante la segunda mitad de los años setenta, justo después de la primera gran crisis petrolera de 1973 y 1979 (Naredo, 2008), con el propósito de aprovechar el uso de estas fuentes virtualmente inagotables para reemplazar el uso de combustibles fósiles.

La mayoría de fuentes de energías renovables se derivan del Sol. Sin embargo, se entiende como energía solar al uso directo de la radiación solar (Tonda, 2003). Uno de los grandes retos científicos y tecnológicos que existe hoy en día es desarrollar maneras eficientes de obtener y utilizar esta forma de energía. Existen diferentes tecnologías que permiten aprovechar la energía solar y se clasifican de forma general por su uso, como por ejemplo la energía térmica, fotovoltaica, eólico-solar y la que es objeto de estudio en este documento, la energía termosolar

de concentración.

La energía termosolar de concentración consiste en el empleo de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre para el calentamiento de un fluido a altas temperaturas en un ciclo termodinámico convencional (Álvarez, 2006). La obtención de la radiación solar se logra gracias a un concentrador óptico y receptor solar, que varían en diseños y disposiciones mecánicas, después existe una conversión mecánica del calor utilizando tecnologías termodinámicas convencionales, que sirven por ejemplo para la generación de electricidad. Las diferentes tecnologías que usan la energía solar presentan inconvenientes, y una de las principales es que el Sol no se encuentra constantemente disponible, existen técnicas que pueden ayudar a superar este inconveniente, una de estas es el control.

1.2. Planteamiento del problema

Desde el punto de vista del control, mientras en otros procesos la principal fuente de energía (p.ej. combustibles fósiles) puede ser manipulada para regular la cantidad de generación de energía. En los sistemas de energía solar la principal fuente de energía, la radiación solar, no puede ser manipulada y, responde a cambios estacionales o perturbaciones ambientales (Escalante y Gutiérrez, 1999). Las plantas termosolares tienen características dinámicas cambiantes (no linealidades e incertidumbres), por lo tanto, cuando las especificaciones de control son muy ajustadas y el sistema de control hace que el proceso funcione a altas frecuencias donde las incertidumbres son mayores, se necesitan técnicas de control más sofisticadas o avanzadas (Seborg, 1999).

Es necesario la investigación y el análisis de las diferentes estrategias de control que permitan una optimización del empleo del recurso solar, así se pueden obtener maneras eficientes de aumentar el número de horas de funcionamiento de las plantas termosolares y reducir costos de producción. En este documento se hace un estudio de un control predictivo basado en matriz dinámica (DMC) por sus siglas en ingles *Dinamic Matrix Control*, que se aplica a la central termosolar por concentradores cilindro parabólicos ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Además, se presentan resultados que permiten realizar mejoras en el control y automatización de este tipo de sistemas.

1.3. Justificación e Importancia

Casi toda la energía disponible en el planeta tiene tres fuentes fundamentales: el Sol en forma directa o indirecta (combustibles fósiles, biomasa, vientos y rayos solares); el proceso de formación cósmica que precedió a la formación del sistema solar actual (energía nuclear y geotérmica) y, finalmente, una pequeña parte de la energía disponible proviene de los movimientos lunares (CONELEC, 2008).

En el Ecuador, la energía solar tiene un gran potencial de aprovechamiento debido a que se encuentra en una ubicación privilegiada en cuanto a radiación solar, pero la participación de esta fuente para cubrir la demanda energética nacional es mínima, por lo que el país está perdiendo la oportunidad de convertir a la energía solar en la tercera fuente de energía, luego del petróleo y la hidroelectricidad (Dossier, 2014).

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE existe una central térmica de concentración que utiliza la radiación solar para calentar un aceite térmico por medio de captadores

solares cilindro parabólicos, donde un caldero permite la acumulación y transferencia de calor entre el aceite que se calienta directamente por la radiación solar y agua que se convertirá en vapor para alimentar una turbina de generación eléctrica. Sin embargo, este proceso no se encuentra controlado y no posee ningún sistema que garantice los niveles de temperatura ni un seguimiento solar, para asegurar el máximo aprovechamiento de la energía que proviene del Sol.

Para controlar este proceso se deben considerar técnicas fiables y factores clave de éxito para diseñar un sistema de control que afronte los principales problemas que genera este tipo procesos. El problema más importante que se identificó es que el proceso presenta un tiempo muerto significativo, por lo que es difícil de controlar con un control realimentado simple como un Proporcional, Integral, y Derivativo (PID). Este retraso se debe al tiempo que tarda el fluido térmico en calentarse y circular desde los captadores solares hasta el intercambiador de calor. Por ello es aconsejable utilizar algoritmos específicos de compensación del tiempo muerto para controlar el proceso (Tamani, 2014).

El estado actual y las futuras tendencias en el campo del control de procesos indican que el control DMC es una buena opción para este proceso, dado que su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos, se puede considerar una tecnología suficientemente introducida en la industria y que, además, sigue despertando muchas expectativas (Camacho y Bordons, 2004). Este trabajo pretende aportar con la aplicación de una estrategia de control para temperatura que pueda emplearse en una futura implementación, puesto que actualmente la planta termosolar de la Universidad de las Fuerzas Armadas ES-PE debe solucionar problemas mecánicos de diseño. Estos hechos, unidos a la existencia de

campos abiertos tanto en investigación como en temas relacionados con la implementación, justifican el uso de esta tecnología.

1.4. Alcance del proyecto de fin de carrera

En este proyecto se pretende diseñar un sistema de control para la central termosolar de media temperatura ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Dadas las características propias de este proceso, se utiliza y evalúa el desempeño de un controlador predictivo DMC, en donde la temperatura es controlada para que se garantice una conversión adecuada de energía. El sistema de control también va a aprovechar el máximo de la radiación solar en los colectores, al analizar el comportamiento del modelo dinámico de la planta. El controlador debe afrontar diferentes perturbaciones como las variaciones cíclicas y estacionales de la intensidad de la radiación, incidencia de nubosidad, humedad ambiental y transparencia del aire, por lo que se realizará una investigación del modelo climatológico de radiación solar propia del país, para que resulte útil analizar el desempeño del controlador a través de diferentes simulaciones.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar un controlador predictivo por matriz dinámica (DMC) de temperatura para una central termosolar de generación eléctrica.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar e investigar documentos técnicos que permitan conocer el potencial solar disponible del país.
- Estudiar el comportamiento dinámico del proceso para obtener un algoritmo que permita simular efectivamente la planta.
- Diseñar un controlador de temperatura predictivo basado en matrices dinámicas para asegurar el intercambio de energía entre el aceite térmico y agua para la generación de vapor.
- Simular el sistema controlado para validar la estrategia de control predictiva por matriz dinámica.

1.6. Organización del documento

El trabajo de investigación presenta a continuación tres capítulos, que se describen de una manera resumida en esta sección para proporcionar al lector una visión general del mismo.

Capítulo 2

Se realiza una síntesis de la información necesaria para el desarrollo de la investigación, al iniciar desde el estudio de las diferentes tecnologías y usos de la energía solar como fuente de generación eléctrica renovable, el análisis de la incidencia solar en el país y su uso con posibilidades de generación eléctrica. El escenario mundial en cuanto a instalaciones de plantas de termosolares y la capacidad de producción de energía eléctrica, y concluyendo con el

análisis del funcionamiento de estaciones solares de generación eléctrica basados en colectores cilindro-parabólicos.

Capítulo 3

Se presenta información del estado actual de la planta termosolar ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Se presenta el comportamiento dinámico del proceso térmico-solar y su validación mediante simulaciones que considerando dos modelos de la planta. De esta manera se obtiene la información de las variables de interés para diseñar un sistema de control que mejore el comportamiento dinámico de la misma.

Se propone la formulación general del controlador DMC, por medio del análisis de las diferentes variables que influyen en los valores de la temperatura del aceite térmico que, a su vez por medio de un intercambiador de calor, transfiere energía para generar vapor útil.

Capítulo 4

En este capítulo se presentan los resultados de las diferentes pruebas por simulación realizadas al sistema controlado, se evalúa el controlador DMC así como se analiza la respuesta dinámica de la planta para los modelos propuestos. Los resultados obtenidos se organizarán y presentarán de tal manera que sea útil para trabajos futuros en este campo y finalmente se exponen las conclusiones del proyecto de investigación.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes

Durante los últimos 50 años la actividad humana, en particular el consumo de combustibles fósiles, ha liberado cantidades de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero suficientes para retener más calor en las capas inferiores de la atmósfera y alterar el clima mundial. En los últimos 130 años el mundo se ha calentado aproximadamente 0,85 °C y los últimos 30 años cada década ha sido más cálida que cualquier década precedente desde 1850 (OMS, 2016).

El desarrollo industrial y tecnológico ha tenido una repercusión directa sobre el medio ambiente (Suárez Tamayo y Molina Esquivel, 2014). La creciente explotación de combustibles fósiles y la necesidad de obtener suficientes recursos energéticos para un desmesurado crecimiento demográfico en urbanizaciones, ha hecho que se busquen fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas (ACCIONA, 2015). Nuestro planeta requiere de

soluciones, y una de ellas es sustituir la producción de energía actual por una que utilice fuentes inagotables o renovables.

En la actualidad, cada vez cobran más fuerza e importancia las energías renovables que aportan contribuciones beneficiosas a la doble problemática del aumento del consumo energético y la protección del medio ambiente (de Juana Sardón, 2003). Se han desarrollado acciones a nivel jurídico en diferentes países para comprometer y hacer esfuerzos de un buen uso de la energía, y el Ecuador no es una excepción. La Constitución de la República del Ecuador entre sus artículos considera y promueve el uso de energías renovables, como se menciona a continuación: “Artículo 15.- El Estado promueve en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanza en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afecta el derecho al agua.” (Asamblea Constituyente, 2008).

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable elaboró para el periodo 2016-2035, el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE) (MEER, 2017), en donde se destaca el “eje Galapagos”, con la iniciativa Cero Combustibles Fósiles en Galápagos, que pretende erradicar el uso de combustibles derivados del petróleo en el archipiélago, mediante el desarrollo de proyectos de energías renovables. Algunos de los proyectos de aprovechamiento de energía solar son:

- Planta fotovoltaica y acumulación energética, Baltra (65 kWp, 4MWh plomo ácido y 268 kWh ion litio).
- Planta fotovoltaica, Puerto Ayora (1,5 MW) .

En el 2014 el Consejo Mundial de Energía elogió la apuesta del gobierno al uso de energías

renovables, y mencionó a Ecuador como país andino líder en el ámbito energético en América Latina (ANDES, 2014). Gracias a que el país tiene una posición geográfica privilegiada, en cuanto a radiación solar, es posible la creación de sistemas energéticos autosustentables que utilicen como fuente la energía solar y que permite: la producción de agua caliente para uso doméstico, como calefacción, como agua destinada a la cocción los alimentos, o para la producción de energía eléctrica.

La Plataforma Solar de Almería (PSA), oficialmente considerada por la Comisión Europea el mayor y más completo centro de investigación y desarrollo en el mundo dedicado a los sistemas de concentración solar térmica (CIEMAT, 2007a). Dentro de la unidad de sistemas solares de concentración de la PSA, existe un grupo de media concentración que utiliza concentradores solares de foco lineal que calientan fluidos térmicos y estos a su vez permiten la generación directa de vapor de agua, gases presurizados y otros fluidos (CIEMAT, 2007b). Este sistema se ha replicado a menor escala en la Universidad de las Fuerzas Armadas, permitiendo realizar una investigación más cercana de los diferentes problemas y retos que presenta este tipo de procesos.

La aplicación y modelado de diferentes técnicas de control en procesos de generación de energía limpia se encuentra activamente en desarrollo, por lo que es importante buscar nuevas alternativas y criterios que permitan la mejora continua de este tipo de plantas. El Control Predictivo por Modelo ha tenido un desarrollo constante, y sus diferentes técnicas como el DMC tienen importantes aplicaciones en la industria como desarrollos para columnas de destilación, plantas de pvc, generadores de vapor y otras que se presentan en (Richalet, 1993) pueden servir de base con criterios para desarrollos posteriores.

2.2. Energía Solar como plan de energías renovables

Casi toda la energía que disponemos es consecuencia directa o indirecta del Sol. Esta estrella con luz propia, alrededor de la cual gira la tierra, es la responsable de las corrientes de aire y formación de nubes, por lo tanto, el origen de otras formas de energía renovable como el viento. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales que con el paso de los siglos han originado combustibles fósiles como el carbón o el petróleo. Por lo tanto, el Sol es la principal fuente de energía que está disponible en nuestro planeta. Sin embargo esta fuente de energía, virtualmente inagotable, no ha sido tomada en cuenta hasta estos últimos años, en donde a presentado relevancia por la necesidad de una “revolución energética” que permita, por el lado de la demanda, acabar con el derroche del sistema energético actual, basado en la quema de combustibles fósiles, y así suprimir las emisiones de efecto invernadero para mitigar el calentamiento global (VILLA, 2014). Se espera que los acuerdos internacionales acerca del cambio climático permitan mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C en relación con la temperatura del año 1850. Los 2°C se consideran el límite de un incremento peligroso, cuyas consecuencias son hoy impredecibles (IDAE, 2007).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés (IPCC) *Intergovernmental Panel on Climate Change*, presentó en el 2014 el Quinto Informe de Evaluación (AR5) sobre el cambio climático, en donde se menciona que es probable que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1 400 años en el hemisferio norte, donde es posible realizar esa evaluación (nivel de confianza medio). Los datos de temperatura de la

superficie terrestre y oceánica, combinados y promediados globalmente, calculados a partir de una tendencia lineal, muestran un calentamiento de 0,85 [0,65 a 1,06] °C , durante el período 1880-2012 (Pachauri y Meyer, 2014), como se puede observar en la figura 1.

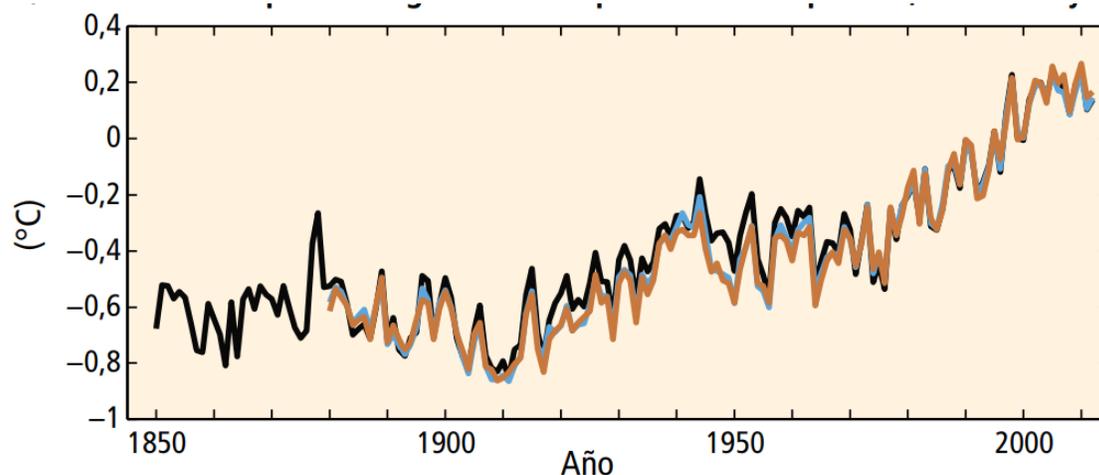


Figura 1: Variación de temperatura de la Tierra respecto al valor de 1850.
Fuente: (Pachauri y Meyer, 2014)

Las fuentes de energía renovable son modelos energéticos sostenibles que pueden cubrir las necesidades energéticas sin afectar negativamente al planeta; y como se mencionó anteriormente, la energía solar es la más importante para este desarrollo. En el Ecuador instituciones gubernamentales como el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) esta empezando a dar los primeros pasos para evaluar el recurso solar y utilizar esta información como base para futuros proyectos. A pesar de que el Ecuador tiene altos niveles de radiación solar, y al estar en la mitad del mundo con un potencial de aprovechamiento enorme de la energía solar, no se ha explotado este recurso; sin embargo, se espera que su uso extensivo ayudará a alcanzar una independencia energética a largo plazo (INER, 2016a).

En el país no existe formalmente un Plan de Energías Renovables en donde se establezcan estrategias de uso para la energía solar; sin embargo el INER ha planteado proyectos como:

“Evaluación e implementación de metodologías de elaboración de balance y prospectiva energética para la soberanía energética y sostenibilidad nacional”, en donde se exponen escenarios modelados en el periodo 2013 – 2050, sobre la base del análisis de múltiples variables entre la oferta y demanda de energía (INER, 2016b).

2.3. Tecnología Solar Térmica de Concentración

Se distinguen dos sistemas de producción de energía de origen solar: los sistemas fotovoltaicos y los sistemas térmicos de concentración. A su vez se distinguen dos tipos basados en sistemas térmicos: los de concentración lineal y puntual (Salgado y María, 2010).

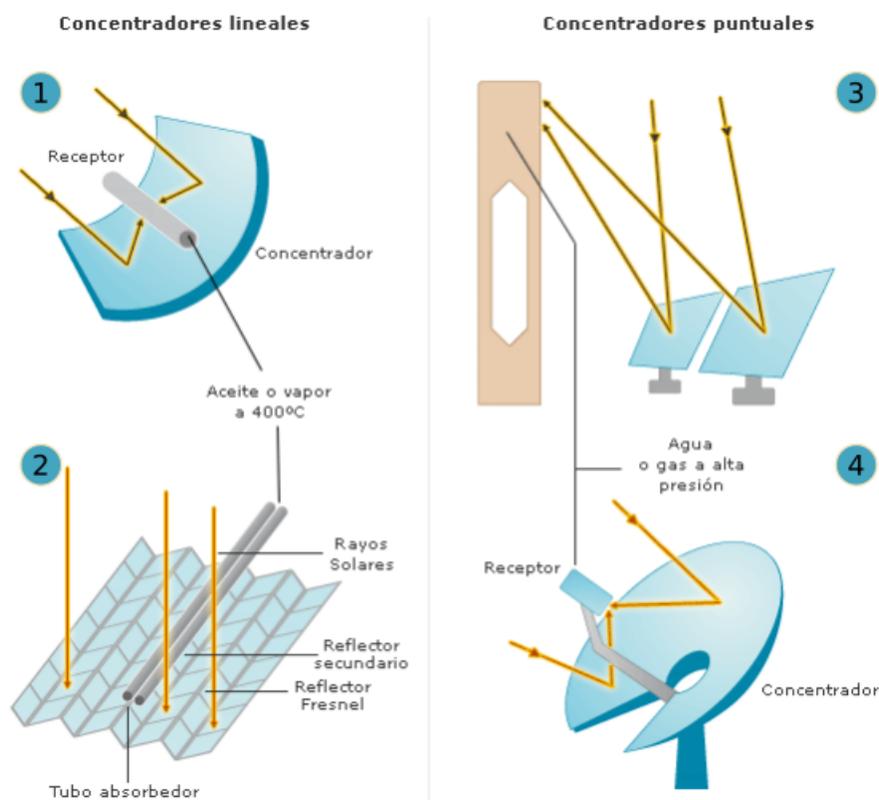


Figura 2: Tecnologías Termosolares de Concentración.
Fuente: (Paredes Velasco, 2012).

Actualmente existen cuatro tecnologías termosolares de concentración (figura 2) que sobresalen por su extendido uso y aplicación a nivel mundial; estos se clasifican de acuerdo al tipo de concentrador que varían en diseño y configuración (Winter y otros., 2012).

Los sistemas termosolares de concentración también conocidos como (CSP), del inglés: *Concentrated Solar Power*, son el conjunto de elementos que utilizan la tecnología basada en la transformación de la componente directa de la radiación solar en energía térmica a alta temperatura, y esta energía térmica en electricidad y/o calor (Espejo Marín, 2010), en todos los casos los sistemas CSP producen calor o electricidad mediante el uso de cientos de espejos que concentran los rayos del Sol a unas temperaturas que oscilan entre 400 y 1.000^o C (Richter y otros., 2009). Estas centrales de energía termosolar son, sin duda, una de las tecnologías energéticas renovables que pueden hacer un aporte considerable de electricidad no contaminante (Agency, 2013).



Figura 3: Estaciones disponibles de la PSA.

Fuente: (CIEMAT, 2007b).

La PSA tiene dos plantas de torre (CESA-1 y CRS), varias instalaciones de enfoque lineal y campos de colectores solares distribuidos (DISS y ACUREX), un horno solar, algunos paneles solares y varios otros experimentos (figura 3) (Camacho y otros., 2014). ACUREX es un campo que se ha utilizado como plataforma de investigación y pruebas. Se utiliza esta planta como base para describir la tecnología y los subsistemas asociados.

2.4. Central Eléctrica Termosolar

Las CSP son una forma viable y a gran escala de obtener energía eléctrica, con un mercado que ha aumentado de forma notable su comercialización y capacidad de generación desde el año 2007, y que obtuvo a finales de 2015 una potencia total instalada en el mundo de 4.940 MW (Mosquera, 2016).

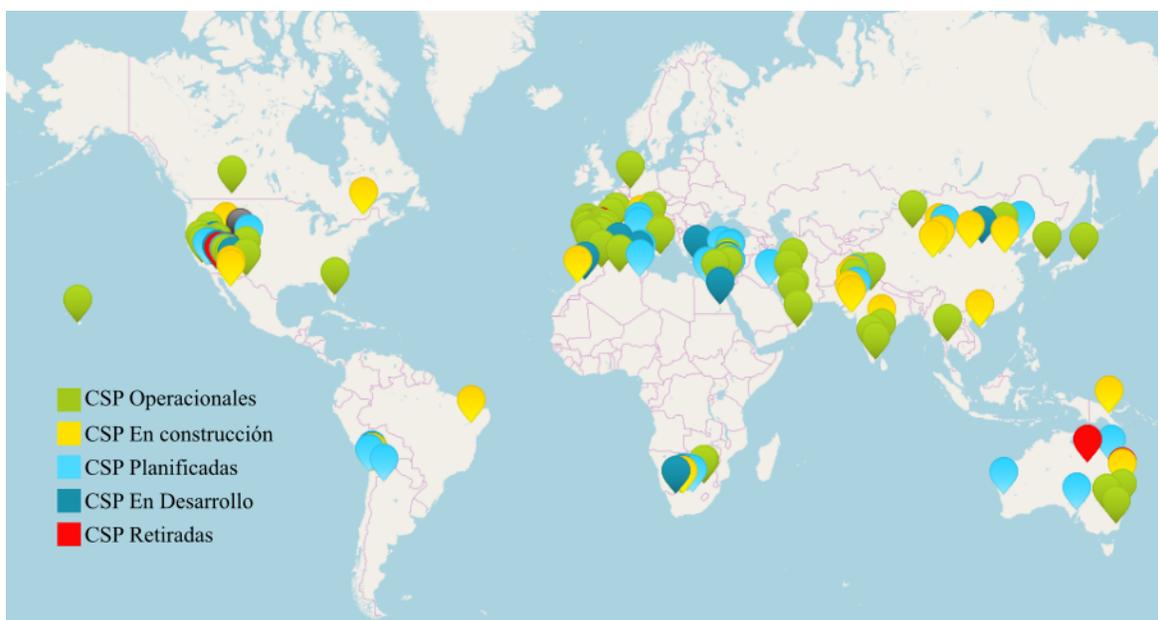


Figura 4: Instalaciones de CSP distribuidas en el mundo.
Fuente: (Cspworld, 2015).

Cada vez existe mayor interés por la CSP a nivel mundial, regiones como África del Norte,

India y China tienen proyectos grandes de instalaciones industriales de plantas generadoras de electricidad por medio de la concentración solar, como se puede observar en la figura 4. Actualmente España es el líder en la producción de energía eléctrica por medio de CSP y se encuentra en una fase avanzada de desarrollo, instalación y aprovechamiento del recurso solar (Sawin y Martinot, 2011).

Una central eléctrica termosolar se compone (figura 5) de un sistema captador, un sistema absorbedor, un sistema de conversión de potencia y, puede incluir también, un sistema de almacenamiento térmico y otro de combustibles (fósiles o renovables) (Ruiz Hernández, 2009).

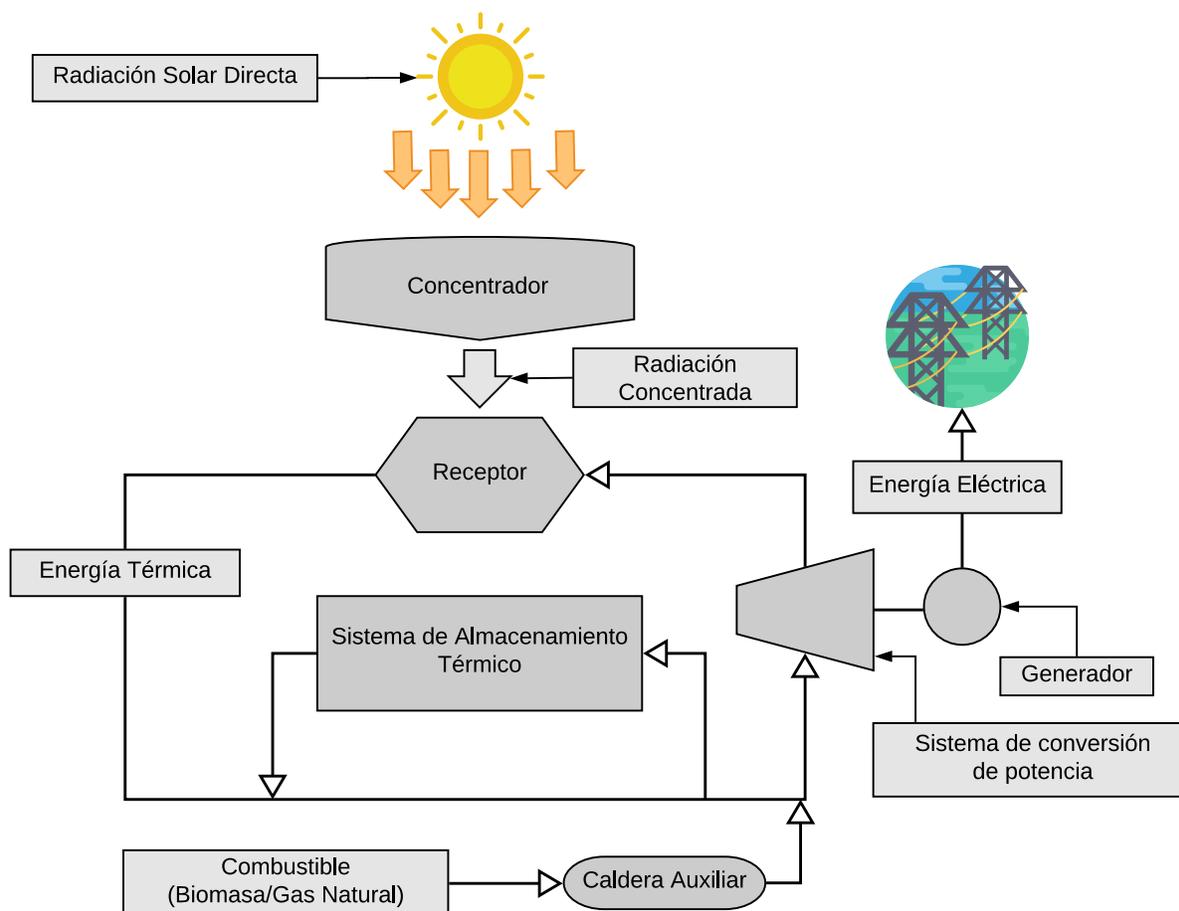


Figura 5: Componentes de una Central Termosolar de Generación Eléctrica.
Fuente: (Ruiz Hernández, 2009).

El sistema captador es el que recibe la radiación solar, la dirige y concentra sobre el absorbedor (receptor), es aquí donde se produce el intercambio de energía térmica a un fluido. Después la energía disponible en el fluido se transfiere a un sistema de conversión de potencia, por ejemplo un intercambiador de calor para conseguir vapor, y así obtener el trabajo necesario para accionar un generador que obtendrá electricidad y/o calor para alimentar algún proceso consumidor de esta forma energética. Los sistemas de almacenamiento térmico y de otro combustible, pueden proveer energía al sistema cuando no existe radiación solar.

La figura 6 muestra un diagrama de tuberías e instrumentación del campo de colectores ACUREX, aquí se puede observar como interactúan los diferentes sistemas que componen una CSP con propósitos de generación eléctrica.

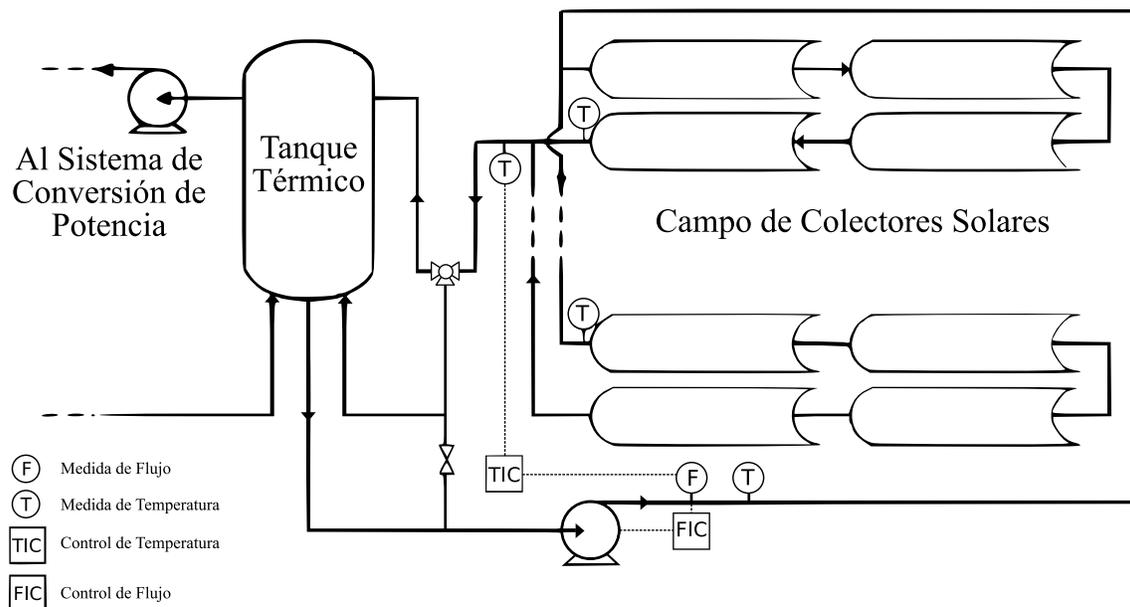


Figura 6: Diagrama esquemático del campo de colectores solares ACUREX.

Fuente: (Camacho y otros., 2014).

2.4.1. Sistema Captador: Colectores Cilindro Parabólicos

En este trabajo se analiza el funcionamiento de una central CSP para la generación eléctrica, en específico del tipo que usa Captadores Cilindro Parabólico (CCP). Estos captadores concentran la radiación solar mediante espejos con forma parabólica en una tubería absorbente que pasa por el foco de la parábola. En el interior de esta tubería absorbente se calienta un fluido que alcanza altas temperaturas (figura 7).

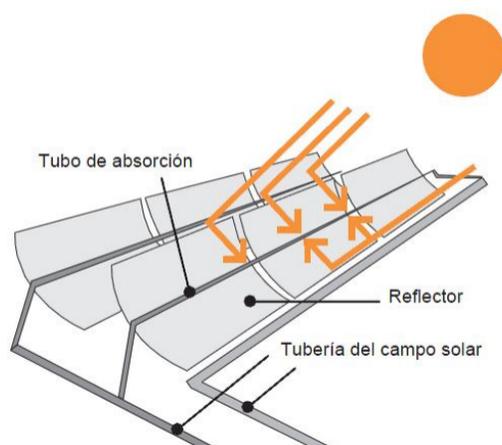


Figura 7: Captador Cilindro Parabólico.
Fuente: (Energía Solar, 2015).

2.4.2. Sistema Captador: Tubo Absorbente

El tubo absorbente (figura 8), es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, este es el elemento donde recae el rendimiento global del colector. Puede constar de un tubo, o más frecuentemente de dos tubos concéntricos. El tubo interior es de cristal con una capa de absorción metálica y debe proporcionar un elevado rendimiento térmico, es por donde circula el fluido que se calienta. El tubo exterior es de cristal y tiene la doble misión de reducir las pérdidas térmicas por convección en el tubo metálico y de protección de las inclemencias

meteorológicas al tubo interior (Solar Symposium, 2014).

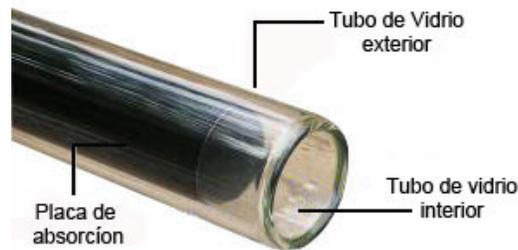


Figura 8: Tubo Absorbente.

Fuente: (AquaySol, 2015).

2.4.3. Sistema Absorbedor: Fluido Térmico

El fluido térmico, que circula por el interior del tubo receptor que se utiliza en los CCP depende de la temperatura máxima de operación. Si las temperaturas que se desean son moderadas ($<200^{\circ}\text{C}$), se puede utilizar agua desmineralizada, o una mezcla con Etileno-Glicol, como fluido de trabajo. En cambio, se utilizan aceites térmicos sintéticos en aquellas aplicaciones donde se desean temperaturas más altas ($200^{\circ}\text{C} < T < 450^{\circ}\text{C}$) (Sánchez, 2015).

2.4.4. Sistema de Almacenamiento Térmico : Tanque de Almacenamiento

El tanque de almacenamiento es un elemento que se incluye para permitir la producción flexible de electricidad y proporcionar un amortiguador entre la generación de electricidad y la entrada solar fluctuante (Kaltz, 1982).

Este elemento es esencial en la puesta en marcha inicial de la planta, como se puede

observar en la figura 6, el sistema dispone de una válvula de tres vías; en su primera posición esta válvula permite que el fluido térmico circule por los captadores solares hasta que la temperatura de salida sea adecuada, en este punto, la válvula cambia de posición y el fluido caliente entra al tanque de almacenamiento.

Por ejemplo el tanque de almacenamiento térmico utilizado en la planta ACUAREX, tiene una capacidad de 140 m^3 que permiten almacenar 2.3 MWh térmicos, para una temperatura de campo de entrada de $210 \text{ }^\circ \text{C}$ y una salida de $290 \text{ }^\circ \text{C}$ (Camacho y otros., 2014).

2.4.5. Sistema de Conversión de Potencia: Intercambiador de Calor de Carcasa y Tubos

El fluido térmico se dirige a un intercambiador de calor cuando este fluido es aceite, para producir vapor que alimenta un proceso industrial (por ejemplo, una turbina para la generación eléctrica) (Zarza y otros., 2002). Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos están compuestos por tubos cilíndricos (figura 9) y son los más usados en la industria. Los tubos proporcionan la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por el interior de los tubos, y la carcasa.

2.5. Control Predictivo basado en Modelo

El Control Predictivo basado en Modelo (MPC), por sus siglas en ingles *Model Predictive Control*, se desarrolló al finales de los setenta y ha tenido un desarrollo considerable desde entonces (Camacho y Alba, 2013).

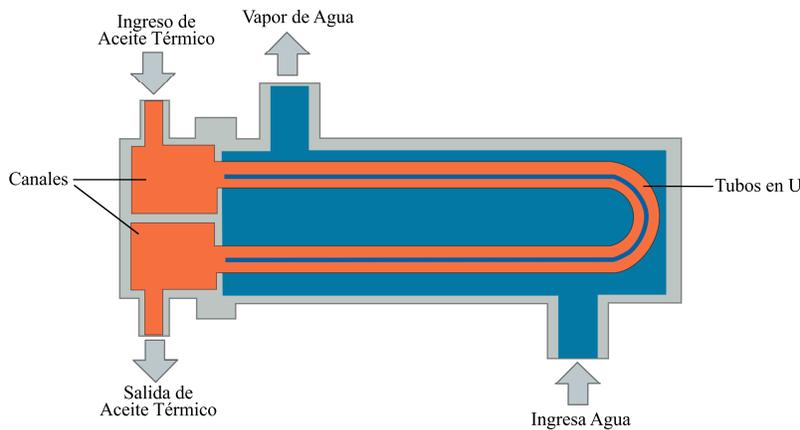


Figura 9: Intercambiador de Calor.

El término MPC no designa una estrategia de control específica, sino más bien una amplia gama de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control al minimizar una función objetivo (Camacho y Bordons, 2004).

Todos los controladores predictivos tienen elementos comunes:

- Modelo de Predicción.
- Función Objetivo.
- Obtención de la ley de control.

Existen aplicaciones de control predictivo a diversos procesos que van desde procesos robóticos (Ortega y Camacho, 1996), anestesia clínica (Linkers y Mahfonf, 1994). Aplicaciones en la industria de cemento, desecadoras, brazos robóticos se pueden encontrar descritas en (Clarke, 1988).

La Tabla 1 muestra las principales ventajas de desventajas de esta estrategia de control.

La metodología de los controladores MPC, se caracterizan por la siguiente estrategia de control, representada en la figura 10:

Tabla 1*Ventajas y desventajas de controladores MPC.*

Ventajas	Desventajas
Atractiva para los operadores, porque los conceptos son muy intuitivos y la sintonización relativamente simple.	Su implementación resulta más difícil que la de los controladores clásicos.
Aplicable a una gran variedad de procesos, desde procesos muy simples hasta procesos con dinámicas complejas.	Altos requisitos de cálculo cuando la dinámica del proceso cambia y existen restricciones.
Su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos.	El uso de un algoritmo de optimización, hace que solo sea implementable por un computador.
Muy útil cuando se conocen las referencias futuras, como ocurre en el caso de robótica o procesos por lote.	Necesidad de un modelo matemático apropiado del proceso.
Permite tratar las restricciones de una forma sistemática y conceptualmente muy simple durante la fase de diseño.	La obtención del modelo del proceso requiere conocimientos de control.

- Se predicen las salida del sistema $\hat{y}(t + k/t)$ al emplear el modelo del proceso, y un horizonte de predicción p . Las predicciones de salida dependen de los valores de entrada y salida conocidas hasta el instante t y de las señales de control futuras $u(t + k/t)$, que se calculan y envían al sistema.
- Las señales de control futuras se calcula minimizando un criterio, con el objetivo de mantener el proceso lo más cerca posible de la trayectoria de referencia.
- La señal de control $u(t/t)$ se envía al proceso mientras que el resto de las señales calculadas no se consideran, ya que la siguiente muestra $y(t + 1)$ es conocida y los pasos anteriores se repiten con este nuevo valor.

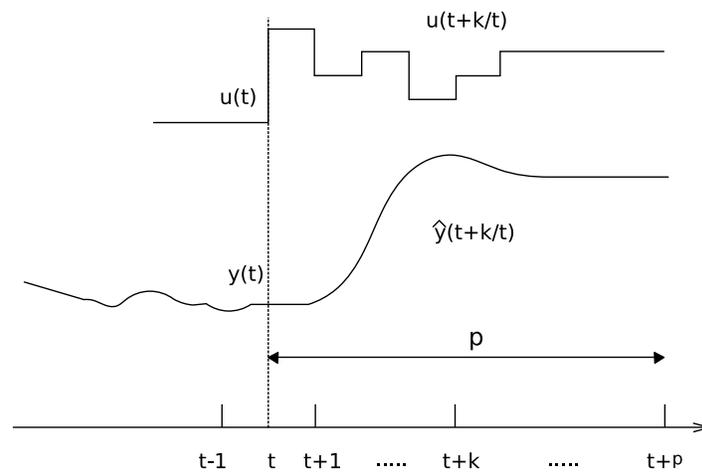


Figura 10: Estrategia MPC.
Fuente: (Camacho y Alba, 2013).

La figura 11 representa la estructura básica para implementar un controlador MPC. El modelo sirve para predecir la evolución de la salida del proceso a partir de las entradas y salidas ya conocidas. Las acciones de control futuras se calculan con el optimizador, que considera la función del coste y las posibles restricciones (Camacho y Bordons, 2004).

Esta estrategia de control requiere que el modelo represente la dinámica del proceso, para poder predecir con precisión y exactitud su respuesta. Así mismo el optimizador debe tener una función de costo que minimice el error. Si la función de costo es cuadrática y no se tienen restricciones, se puede obtener una solución explícita, si no es el caso se debe recurrir a un algoritmo numérico que necesariamente requiere más capacidad de cómputo.

Uno de los algoritmos más populares y con gran trayectoria de aplicación en la industria es el DMC, desarrollado por (Cutler y Ramaker, 1980) en los años ochenta de la empresa Shell Oil Co, ha sido ampliamente utilizado en la industria, especialmente en la petroquímica (Qin y Badgwell, 1997), debido a la simplicidad del algoritmo y a la utilización del modelo de respuesta ante impulso que, aunque requiriendo muchos más parámetros que las formulaciones

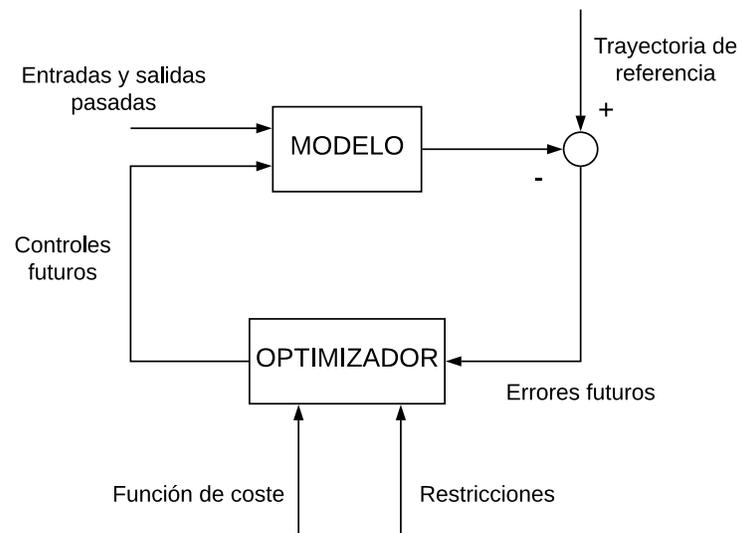


Figura 11: Diagrama de bloques MPC.
Fuente: (Camacho y Alba, 2013).

en el espacio de estado o en el dominio de entrada y salida, resulta más intuitivo y requiere mucha menos información a priori para la identificación (García y otros., 1989).

En este documento solo se usa y analiza el algoritmo estándar DMC para un problema de control de una entrada y una salida SISO, por sus siglas en inglés *Single-Input Single-Output*, tampoco se aborda el efecto de las perturbaciones medibles que se pueden incluir en la predicción, ya que en la presente investigación no se tiene un modelo de perturbaciones medibles en la CSP, como por ejemplo: paso de nubes, humedad, etc. Los detalles técnicos propios del algoritmo comercial como compatibilidades de software y hardware.. etc, no se detallan.

2.5.1. Control por Matriz Dinámica

Modelo de Predicción

El modelo de proceso empleado es la respuesta escalón de la planta, mientras las perturbaciones se consideran constantes a lo largo del horizonte de funcionamiento. La respuesta al escalón de una planta se expresa como:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (2.5.1)$$

Donde g_i son los valores muestreados ante la entrada escalón y $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$, como se muestra en la figura 12.

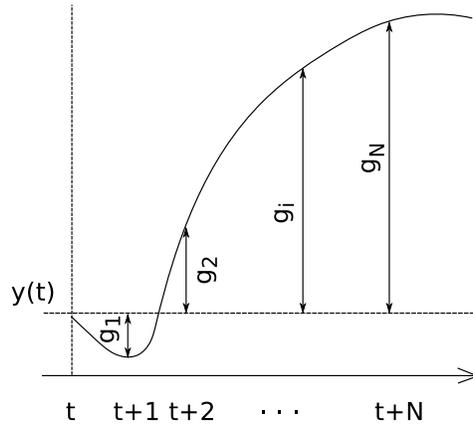


Figura 12: Respuesta ante escalón.
Fuente: (Camacho y Alba, 2013).

Con la ecuación 2.5.1, los valores que se predicen a lo largo del horizonte se expresan como:

$$\hat{y}(t+k/t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + \hat{n}(t+k/t) \quad (2.5.2)$$

Donde \hat{n} representa las perturbaciones futuras, la ecuación 2.5.2 también se puede escribir como:

$$\hat{y}(t + k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t + k - i) + \hat{n}(t + k/t)$$

Si se considera que en el futuro las perturbaciones son constantes, es decir $\hat{n}(t + k/t) = n(t/t) = y_m(t) - \hat{y}(t/t)$, entonces:

$$\hat{y}(t + k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t + k - i) + y_m(t) - \hat{y}(t/t)$$

El término $\hat{y}(t/t)$ es igual a la ecuación 2.5.1 , por lo tanto se reemplaza en la ecuación anterior y se aplican las propiedades de agrupación de sumatorias, para obtener:

$$\hat{y}(t + k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + f(t + k) \quad (2.5.3)$$

Donde el primer término corresponde a la respuesta forzada, es decir la respuesta futura en el horizonte de predicción debido a las acciones de control futuras.

El termino $f(t + k)$ es la respuesta libre del sistema que describe el comportamiento del proceso debido a su estado actual incluyendo el efecto de las acciones pasadas, y se expresa como:

$$f(t + k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t - i)$$

Si el proceso después de N periodos de muestreo se vuelve asintóticamente estable, los

coeficientes g_i de la respuesta escalonada tienden a un valor constante, por lo que se puede considerar que:

$$g_{k+i} - g_i \approx 0$$

y, por lo tanto, la respuesta libre se puede calcular como:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (2.5.4)$$

Hay que tener en cuenta que si el sistema no se vuelve estable N no existe, y la respuesta libre no puede ser calculada.

Ahora las predicciones pueden ser calculadas utilizando la ecuación 2.5.3 a lo largo del horizonte de predicción ($k = 1, \dots, p$) considerando m acciones de control, es decir en un horizonte de control:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+1/t) &= g_1 \Delta u(t) + f(t+1) \\ \hat{y}(t+2/t) &= g_2 \Delta u(t) + g_1 \Delta u(t-1) + f(t+2) \\ &\vdots \\ \hat{y}(t+p/t) &= \sum_{i=p-m+1}^p g_i \Delta u(t+p-i) + f(t+p) \end{aligned}$$

Los coeficientes g_i se pueden representar como una matriz dinámica G :

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-m+1} \end{bmatrix} \quad (2.5.5)$$

y la ecuación de predicción 2.5.3, se representa matricialmente como:

$$\hat{y} = Gu + f$$

Obsérvese que G tiene m columnas y p filas, donde los coeficientes g_i se desplazan apropiadamente en orden hacia abajo. El vector \hat{y} de dimensión p , contiene las predicciones de la respuesta de la planta a lo largo del horizonte de predicción, u es un vector de dimensión m que contiene los incrementos de control y f es el vector de respuesta libre.

El vector f depende de un vector de estados $x(t)$, que en este caso viene dado como $x(t)^T = [y_m(t) u(t-1) u(t-2) \dots u(t-N-1)]$, y puede ser representado como $Fx(t)$. Por lo tanto la predicción queda expresada como:

$$\hat{y} = Gu + Fx(t) \quad (2.5.6)$$

Función de Coste

El objetivo del controlador DMC es llevar la salida lo mas cerca posible al valor de referencia. La variable manipulada se selecciona para minimizar los errores cuadráticos en el horizonte de predicción, la función de coste viene dada por la expresión:

$$J = \sum_{j=1}^p [\hat{y}(t + j/t) - w(t + j/t)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda [\Delta u(t + j - 1)] \quad (2.5.7)$$

Nótese que el segundo sumando de la ecuación 2.5.7 considera el esfuerzo de control ponderando un valor de λ , este valor puede ser constante y se considera un parámetro de sintonización.

Como se menciona en la Tabla 1, una de las ventajas de los controladores MPC es que si se conoce los valores futuros de referencia, se puede obtener un trayectoria de referencia w , que no necesariamente coincida con el valor real de referencia r .

Se puede hacer una aproximación suave para el valor actual de la salida $y(t)$ hacia la referencia conocida, por medio de un sistema de primer orden:

$$w(t + k) = \alpha w(t + k - 1) + (1 - \alpha)r(t + k), \quad k = 1 \dots p \quad (2.5.8)$$

En la figura 13, la forma de la trayectoria w se muestra cuando la referencia $r(t + k)$ es constante y para dos valores diferentes de α . Los valores pequeños de este parámetro proporcionan un seguimiento rápido (w_1), si se aumenta, la trayectoria de referencia se convierte en (w_2), dando lugar a una respuesta más suave (Camacho y Alba, 2013).

Si no existen perturbaciones, la minimización de la función de coste J representado por

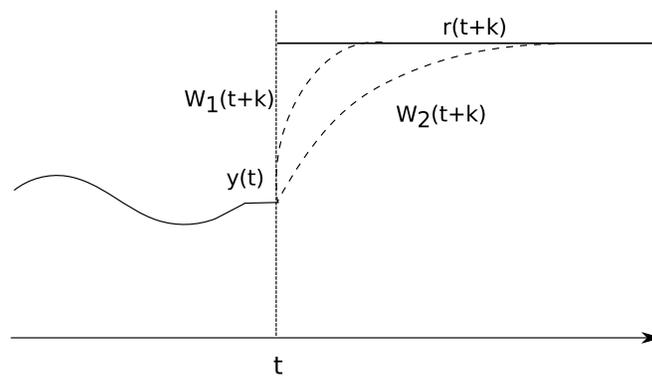


Figura 13: Trayectoria de referencia.
Fuente: (Camacho y Alba, 2013).

la ecuación 2.5.7, se puede expresar como:

$$J = ee^T + \lambda uu^T \quad (2.5.9)$$

Donde e es el vector de errores futuros a lo largo del horizonte p y u es el vector compuesto por los incrementos de control futuros $\Delta u(t), \dots, \Delta u(t+m)$.

Ley de control

Consiste en obtener las variaciones de control que minimicen la función de coste, por lo tanto si matemáticamente se deriva la ecuación 2.5.9 y se hace igual a cero, se obtiene :

$$u = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f)$$

Como se mencionó anteriormente solo el primer elemento de u se envía a la planta por lo tanto:

$$u = K(w - f) \quad (2.5.10)$$

Donde K es la primera fila de la matriz $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$, este echo se da debido a que si no hay errores futuros, entonces no hay variación en la señal de control, caso contrario existirá un incremento de la acción de control proporcional (con factor K) al error futuro (Camacho y Bordons, 2004).

2.6. Conclusiones del Capítulo

En este capítulo, se han introducido brevemente los fundamentos de la energía solar como una fuente de energía renovable, destacando el uso actual de la misma en proyectos en el Ecuador y el mundo. También se ha realizado una visión general de las principales tecnologías solares, en especial la de concentración térmica, descripciones generales y ejemplos de centrales termosolares a nivel mundial se han dado para tener una visión general del uso actual de este tipo de tecnología. Se ha echo una introducción a conceptos del funcionamiento de centrales termosolares por concentración, específicamente las que usan captadores cilindro parabólicos. Así también se ha echo una revisión de controladores predictivos, mostrando sus ventajas y desventajas, detallando la estrategia de control DMC. Se han destacado los aspectos teóricos de la planta y el controlador, datos que se usan en los siguientes capítulos.

Capítulo 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1. Descripción Actual de la Planta

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, existe una Central Solar Térmica que utiliza concentradores Cilindro Parabólicos, esta planta fue desarrollada en varias etapas desde el 2015, y en esta se han realizado diferentes ensayos, como por ejemplo para propósitos de calefacción disponible en (Mera Pérez y otros., 2016).

La planta consiste de 18 colectores solares distribuidos en 3 filas, que forman tres lazos de seis colectores cada uno (figura 14). El aceite térmico es bombeado desde un reservorio por todo el circuito de tubería, donde el fluido térmico obtiene energía a través del tubo absorbente.

El campo de colectores no dispone de un sistema de seguimiento solar, sin embargo mecánicamente esta construido para que los lazos de captadores solares roten alrededor del foco de la parábola. El sistema no dispone de un tanque de almacenamiento, por lo que el aceite



Figura 14: CSP de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

que sale del campo de colectores es enviado directamente a un intercambiador de calor.

Para la fecha que se realiza este trabajo, la planta no se encuentra en funcionamiento debido a fallas mecánicas por falta de mantenimiento. Sin embargo para la presente investigación se han considerado los parámetros de diseño de la misma, con el propósito de obtener un modelo que simule el comportamiento dinámico del proceso y aplicar una estrategia de control, con el objetivo de mantener la temperatura del aceite de salida en un nivel deseado.

3.2. Cálculo de la Irradiancia Directa Solar

La velocidad a la que la energía solar alcanza un área unitaria en la Tierra se denomina irradiancia solar y se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Cuando la radiación solar golpea la atmósfera, parte de ella se refleja, otra parte es dispersada o absorbida por el aire. La radiación que alcanza la superficie directamente y no es absorbida, reflejada o dispersa, se llama radiación solar directa. La radiación reflejada y dispersa se llama radiación difusa, y la

radiación de albedo es la fracción que llega al suelo y se refleja en la atmósfera. La radiación total es la suma de las tres componentes anteriores (Piña, 2011).

Los CCP son capaces únicamente de captar radiación directa (Busso y otros., 2009), por lo tanto las otras dos se descartan, para este cálculo se requieren los siguientes parámetros:

- Angulo cenital solar θ_s : Es la posición del sol relativa a la normal local, toma valores entre 0° y 90° y depende de la latitud y declinación del lugar.
- Declinación δ : Es la posición angular del Sol al medio día solar, respecto al plano del ecuador. Su valor varía entre $\pm 23^\circ 15'$.
- Ángulo horario τ : Indica el desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar. Se toma como origen del ángulo el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del Sol. Cada hora corresponde a 15° ($360^\circ/24$ horas).
- Latitud Γ : Es la distancia angular que hay desde un punto de la superficie de la Tierra hasta el paralelo del ecuador; se mide en grados, minutos y segundos sobre los meridianos.
- Longitud L : En cartografía, expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano Greenwich.

Es de interés utilizar métodos fáciles para realizar una estimación de la radiación solar global promedio por hora en superficies horizontales, una estimación de radiación solar diaria para una superficie horizontal se puede realizar principalmente en base a modelos físicos o modelos basados en datos, algunos modelos se muestran a profundidad en (Tymvios y otros., 2005).

En el presente trabajo se usa el modelo para cielos despejados y superficies horizontales propuesto por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) (ASHRAE, 2009), la ecuación que describe la irradiancia directa es la siguiente:

$$I_o = Ae^{\left(\frac{-B}{\cos\theta_s}\right)} \quad (3.2.1)$$

Donde, A es la constante de radiación solar aparente y B es el coeficiente de extinción atmosférica. El coseno del ángulo cenital (θ_s), viene dado por la ecuación:

$$\cos\theta_s = (\cos\delta)(\cos\Gamma)(\cos\tau) + (\sen\delta)(\sen\Gamma) \quad (3.2.2)$$

La declinacion solar (δ) viene dado por (Duffie y Beckman, 1980):

$$\delta = 23,45\sen\left(\frac{360(n + 284)}{365}\right) \quad (3.2.3)$$

Donde n es el numero natural del día del año, siendo “1” el primero de Enero y “365” el ultimo día del año en caso de no ser bisiesto. El ángulo horario (τ) es una medida angular del tiempo equivalente a 15° por hora siendo positivo en la tarde y negativo en la mañana, esta dado por la ecuación:

$$\tau = 15(HSL - 12,0) \quad (3.2.4)$$

La hora solar local (HSL) es calculado de la hora local en minutos (HL) y la ecuación del tiempo (ET), dado por:

$$HSL = HL + \frac{ET}{60} - \frac{4}{60(L_s - L_L)} \quad (3.2.5)$$

Donde L_s es el meridiano estándar, cuyo valor es 45° y L_L es la longitud de la ubicación en grados oeste ($0^\circ < L_L < 360^\circ$). La ecuación del tiempo se obtiene de fórmulas dadas por (Tasdemiroglu, 1990) :

$$ET = 9,87\text{sen}(2C) - 7,53\text{cos}(C) - 1,5\text{sen}(C) \quad (3.2.6)$$

$$C = \frac{360(n - 81)}{365} \quad (3.2.7)$$

El cálculo de irradiancia directa por el modelo ASHRAE para superficies horizontales y cielo despejado está, por lo tanto, completamente especificado calculando los valores de los parámetros: $\cos\theta_s$, δ , τ , Γ , L , A y B . La hora local es el único parámetro variable que se ingresa para los cálculos de cualquier día del año. Los coeficientes promedios solares para cada mes están dados por ASHRAE y se encuentran detallados en en la Tabla 2.

Para el cálculo de la irradiancia solar incidente en la CSP de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se toma como dato las coordenadas de referencia: -0.312741, -78.445810. En la Tabla 3 se puede observar datos calculados para la irradiancia solar del 25 de Enero. Se consideran que las horas de luz útil van desde las 7.00 h hasta las 17.00 h.

Otro factor a tener en cuenta es la orientación del colector y el mecanismo que permita hacer un seguimiento lo más preciso posible. El seguimiento perfecto del Sol ocurrirá cuando el vector unitario \bar{n} , normal a la superficie de abertura del CCP, coincida con el vector unitario

Tabla 2

Constantes ASHRAE para valores promedio mensual.

Mes	A, [Wm^{-2}]	B, [<i>adimensional</i>]
Enero	1229,882	0,142
Febrero	1216,255	0,144
Marzo	1190,407	0,153
Abril	1144,663	0,175
Mayo	1109,680	0,192
Junio	1092,697	0,202
Julio	1084,880	0,207
Agosto	1102,986	0,202
Septiembre	1142,120	0,182
Octubre	1183,449	0,164
Noviembre	1213,611	0,151
Diciembre	1228,004	0,145

Fuente: (ASHRAE, 2009).

\bar{s} de la radiación directa (figura 15), puesto que de esta forma, el plano de abertura del colector será perpendicular a los rayos solares incidentes (Velasco, 2012).

Por lo tanto un parámetro importante que afecta la cantidad de energía que aprovecha realmente el colector es el ángulo de incidencia (θ) de la irradiancia directa al plano de la apertura del colector. El coseno de este ángulo es un factor multiplicativo de la irradiancia directa solar, dando como resultado la irradiancia efectiva I_{ef} , viene dado por la siguiente formula:

$$I_{ef} = I_o \times \cos\theta \quad (3.2.8)$$

Según la posición y el mecanismo del seguimiento solar, existen diferentes valores para el

Tabla 3*Valores de Irradiancia directa ASHRAE.*

HL [Horas]	Γ [grados]	L [grados]	HSL [grados]	τ [grados]	δ [grados]	I_o [Wm^{-2}]
7	-0,312	-78,445	6,796	-78,047	-19,263	598,832
8	-0,312	-78,445	7,792	-63,105	-19,263	883,178
9	-0,312	-78,445	8,789	-48,161	-19,263	982,210
10	-0,312	-78,445	9,785	-33,213	-19,263	1027,912
11	-0,312	-78,445	10,782	-18,263	-19,263	1050,044
12	-0,312	-78,445	11,779	-3,309	-19,263	1058,158
13	-0,312	-78,445	12,776	11,647	-19,263	1055,094
14	-0,312	-78,445	13,773	26,607	-19,263	1039,806
15	-0,312	-78,445	14,771	41,570	-19,263	1006,385
16	-0,312	-78,445	15,769	56,537	-19,263	937,116
17	-0,312	-78,445	16,767	71,506	-19,263	767,599

$\cos\theta$. La CSP que es objeto de estudio en este trabajo no dispone de un seguimiento solar, por lo tanto se considera colectores fijos donde el plano de abertura del CCP sea perpendicular a I_o al mediodía en los equinoccios de verano e invierno:

$$\cos\theta = \cos\delta \times \cos\tau \quad (3.2.9)$$

La irradiancia efectiva que aprovecha el CCP, para los valores de la Tabla 3 se muestran a continuación:

Se ha desarrollado una función en Matlab[®], que permite obtener valores de irradiancia para un intervalo de tiempo en horas, para cualquier día natural del año, desde una hora local inicial, y con un periodo de muestreo t . Esta función se encuentra detallada en el Anexo

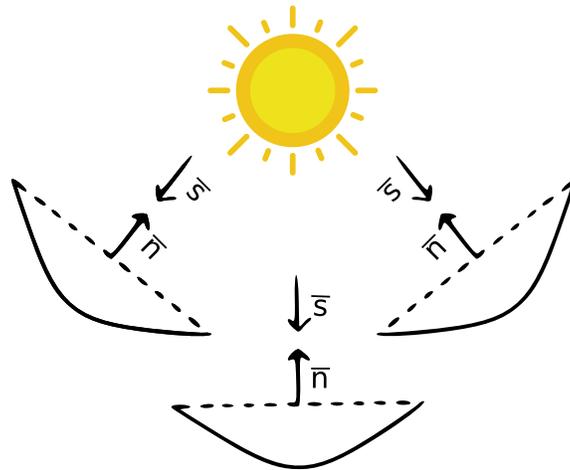


Figura 15: Esquema del Sol y la apertura del colector.

A.

3.3. Modelado de la Planta Solar

Existen varios enfoques de modelado ampliamente aceptado que se pueden encontrar en la literatura, y se presentan en (Brosilow y Joseph, 2002), los modelos matemáticos de este proceso han sido utilizados para diferentes propósitos: modelos de control, simulación, modelos de optimización del punto de ajuste, tolerancia a fallas, etc (Camacho y otros., 1989). Principalmente existen dos modelos matemáticos que se han desarrollado estos permiten conocer la distribución de temperaturas del tubo receptor y del aceite térmico a lo largo del lazo de colectores para un instante dado, como también la variación temporal de las temperaturas en un determinado punto del colector (Morales Caro, 2013):

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

Tabla 4
Valores de Irradiancia efectiva ASHRAE.

HL [Horas]	I_o [Wm^{-2}]	$cos\theta$	I_{ef} [Wm^{-2}]
7	598,832	0,196	117,077
8	883,178	0,427	377,133
9	982,210	0,630	618,487
10	1027,912	0,790	811,835
11	1050,044	0,896	941,321
12	1058,158	0,942	997,247
13	1055,094	0,925	975,510
14	1039,806	0,844	877,633
15	1006,385	0,706	710,758
16	937,116	0,521	487,790
17	767,599	0,299	229,842

El modelo de parámetros distribuidos es mas completo ya que tiene en cuenta gran parte de la dinámica no lineal del lazo de colectores, en cambio el de parámetros concentrados es un modelo más simple. Para realizar las simulaciones se hará uso del modelo de parámetros distribuidos. A partir de este modelo se realiza una aproximación mas simple para aplicar la técnica de control DMC; tanto el modelo de parámetros distribuidos como la aproximación se usan para validar el controlador DMC.

3.3.1. Modelo de Parámetros Distribuidos

Para formular el modelo se han hecho las siguientes suposiciones (Camacho y otros., 1989):

- Las propiedades del aceite térmico son consideradas como función de la temperatura.
- Se supone que el flujo en cada sección es circunferencialmente uniforme e igual al valor

promedio.

- Las variaciones en la temperatura radial de la pared del tubo no se tienen en cuenta. Esta suposición es razonable en el caso de una pared delgada con buena conductividad térmica.
- El flujo del aceite térmico y la irradiancia se consideran funciones de tiempo y son siempre las mismas para cada elemento (se supone un fluido incompresible).
- Las pérdidas causadas por la conducción de calor axial en ambos lados de la pared de la tubería y del fluido son insignificantes. La conducción axial en el tubo debe ser leve dado que la pared es delgada y tiene una alta resistencia al calor. La conducción axial en el fluido es relativamente pequeña ya que la conductividad del fluido térmico es pobre.

Usando los supuestos anteriores y aplicando la ley de conservación de la energía, el modelo viene descrito por el siguiente par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales:

$$p_m c_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t}(t, l) = \eta_{col} G I(t) - D_m \pi H_l (T_m(t, l) - T_a(t, l)) - D_f \pi H_t (T_m(t, l) - T_f(t, l)) \quad (3.3.1)$$

$$p_f c_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) + p_f c_f q(t) \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, l) = D_f \pi H_t (T_m(t, l) - T_f(t, l)) \quad (3.3.2)$$

En estas ecuaciones el índice m se refiere a la tubería de metal, y f al fluido térmico, donde :

p_f y p_m : es la densidad [kg/m^3].

c_f y c_m : es el capacidad térmica [$J/kg^\circ C$].

A_f y A_m : es el área de la sección transversal de la tubería interna y externa respectivamente [m^2].

T_f y T_m : es la temperatura [$^\circ C$].

T_a : es la temperatura ambiente [$^\circ C$].

t : es el tiempo [s].

l : es la posición a lo largo de la tubería [m].

η_{col} : es la eficiencia óptica del colector.

G : es la apertura del colector [m].

I : es la irradiancia directa efectiva que aprovechan los colectores [W/m^2].

D_f y D_m : es el diámetro de la tubería interna y externa respectivamente [m^2].

H_l : es el coeficiente global de pérdidas térmicas [$W/(m^2^\circ C)$].

H_t : es el coeficiente de transferencia de calor por convección dentro de la tubería [$W/(m^2^\circ C)$].

q : es el caudal [m^3/s].

Este modelo muestra adecuadamente la dinámica del proceso de la distribución de temperatura en el tubo de absorción y en el aceite térmico a lo largo del lazo del colector, en donde el fluido y las paredes de la tubería son modelados separadamente.

Las ecuaciones 3.3.1 y 3.3.2 describen la parte activa del tubo, es decir, la tubería que recibe la irradiancia solar en la línea focal del CCP. Los elementos pasivos son las partes de tubería donde no recibe irradiancia, las ecuaciones que los describen son similares a las ecuaciones 3.3.1 y 3.3.2, la diferencia es que el valor de I es cero (Camacho y otros., 1989). Por lo tanto el modelo para el lazo de colectores completo queda descrito como una serie de elementos activos y pasivos.

Las ecuaciones 3.3.1 y 3.3.2 se puede resolver usando un proceso iterativo con diferencias finitas. Las temperaturas del fluido y el tubo de absorberencia se calculan para cada k intervalo de tiempo y para cada n elemento de longitud Δl en dos etapas(Camacho y otros., 1997):

- Primera Etapa:

$$\begin{aligned}
 T_m(k, n) = & T_m(k-1, n) + \frac{\Delta t}{\rho_m c_m A_m} (\eta_{col} G I(k) \\
 & - D_m \pi H_l (T_m(k-1, n) - T_a(k)) \\
 & - D_f \pi H_t (T_m(k-1, n) - T_{1f}(k-1, n)))
 \end{aligned} \tag{3.3.3}$$

$$T_f(k, n) = T_{1f}(k-1, n) + \frac{\pi D_f H_t \Delta t}{\rho_f c_f A_f} (T_m(k-1, n) - T_{1f}(k-1, n)) \tag{3.3.4}$$

- Segunda Etapa:

$$T_{1f}(k, n) = T_f(k, n) - \frac{q(k) \Delta t}{A_f \Delta l} (T_f(k, n) - T_f(k, n-1)) \tag{3.3.5}$$

En la figura 16 se muestra un diagrama de bloques del modelo de parámetros distribuidos donde puede ser representado el balance energético del sistema. Se tiene como entradas al sistema la Irradiancia I , la temperatura de entrada $Temp. In$, la temperatura ambiente Ta y el caudal q , en cada intervalo de tiempo K y para cada segmento de tubería n .

del sistema, la variable de salida del sistema es la temperatura corregida del último segmento, cada k intervalos de tiempo.

A continuación se presentan las diferentes constantes utilizadas en las ecuaciones anteriores, estas se obtienen de los datos de diseño de la CSP de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE disponibles en (Mera Pérez y otros., 2016):

Tabla 5

Parámetros constantes del campo de colectores de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Símbolo	Nombre	Valor
p_m	Densidad de la tubería DIN 1.4404	8027 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
c_m	Capacidad térmica tubería DIN 1.4404	500 $\left[\frac{J}{kg^\circ C}\right]$
G	Apertura del colector	1.2[m]
D_m	Diámetro exterior de la tubería	0.028448[m]
D_f	Diámetro interior de la tubería	0.0266446 [m]
η_{col}	Eficiencia óptica del colector	0.658
A_m	Area de la sección transversal externa de la tubería	$6,3561 \times 10^{-4} [m^2]$
A_f	Área de la sección transversal interna de la tubería	$5,5758 \times 10^{-4} [m^2]$

Las propiedades del aceite térmico y los coeficientes de pérdidas son funciones de la temperatura, para este proyecto se utiliza el aceite térmico Therminol 55[®]. De los datos suministrados por el productor del aceite (Kaltz, 1982), se tiene:

$$p_f = 903 - 0,672T_f [kg/m^3] \quad (3.3.6)$$

$$c_f = 1820 + 3,478T_f [J/(kg^\circ C)] \quad (3.3.7)$$

$$H_t = H_v q^{0,8} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$$

por lo que,

$$H_v = 2,17 \times 10^6 - 5,01 \times 10^4 T_f + 4,53 \times 10^2 T_f^2 - 1,64 T_f^3 + 2,1 \times 10^{-3} T_f^4 \quad (3.3.8)$$

$$H_t = 0,00249 \Delta T - 0,06133 [J/(kg \cdot ^\circ C)] \quad (3.3.9)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura entre la temperatura del fluido y la temperatura ambiente $\Delta T = T_f - T_a$.

Definidas todas las ecuaciones que describen el modelo, se implementa el algoritmo en Matlab[®], la CSP tiene tres lazos de colectores, cada uno con una longitud de ocho metros, con lo que se dispone de un total de 24 metros de elementos activos, y seis metros de elementos pasivos. Es importante mencionar que se supone un caudal laminar por todo el circuito, este caudal se divide uniformemente para cada lazo de colector. El detalle de este código esta disponible en el Anexo B.

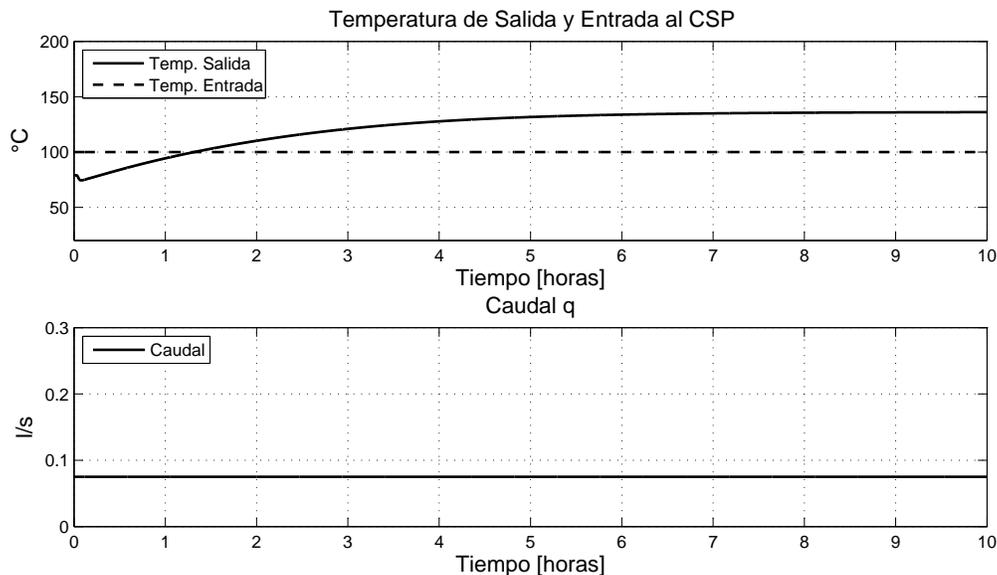


Figura 17: Temperatura de Salida de CSP con caudal constante.

La figura 17 muestra la simulación por modelo de parámetros distribuidos con una temperatura constante de entrada de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, una Irradiancia constante de $700\text{ [W/m}^2\text{]}$ y un caudal constante de 0.075 litros por segundo $[\frac{l}{s}]$, utilizando aceite térmico Therminol 55[®]. Las temperaturas del fluido y el tubo de absorberencia se calculan para cada intervalo de tiempo y para cada elemento, con una temperatura inicial del metal de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una temperatura inicial del fluido de $78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cada segmento tiene un metro de largo y el intervalo de tiempo es de 0.5 s .

En la figura 18 se muestra la simulación al emplear los valores de Irradiancia para colector fijo obtenidos por el método ASHRAE de la Tabla 4, con las condiciones anteriormente mencionadas. Como los valores de Irradiancia se calculan para un colector fijo, se puede apreciar que se tiene un máximo valor cerca del medio día. En este tipo de sistemas asegurar un valor de irradiancia, permite que los valores de temperatura de salida del campo de colectores lleguen a valores que se aprovechen para propósitos de generación eléctrica.

3.3.2. Identificación de modelo lineal de la planta solar

La dinámica de un sistema, puede ser representado como una relación algebraica de la salida con la entrada. Esta relación es conocida como función de transferencia, y puede expresarse como una función temporal (respuesta impulsional), como una transformada de Laplace si el sistema es continuo y transformada Z si el sistema es muestreado (Nise y Romo, 2002).

La identificación de un sistema se puede conseguir a partir de un modelo de caja negra, donde al tomar como insumo datos experimentales de la respuesta del sistema se puede

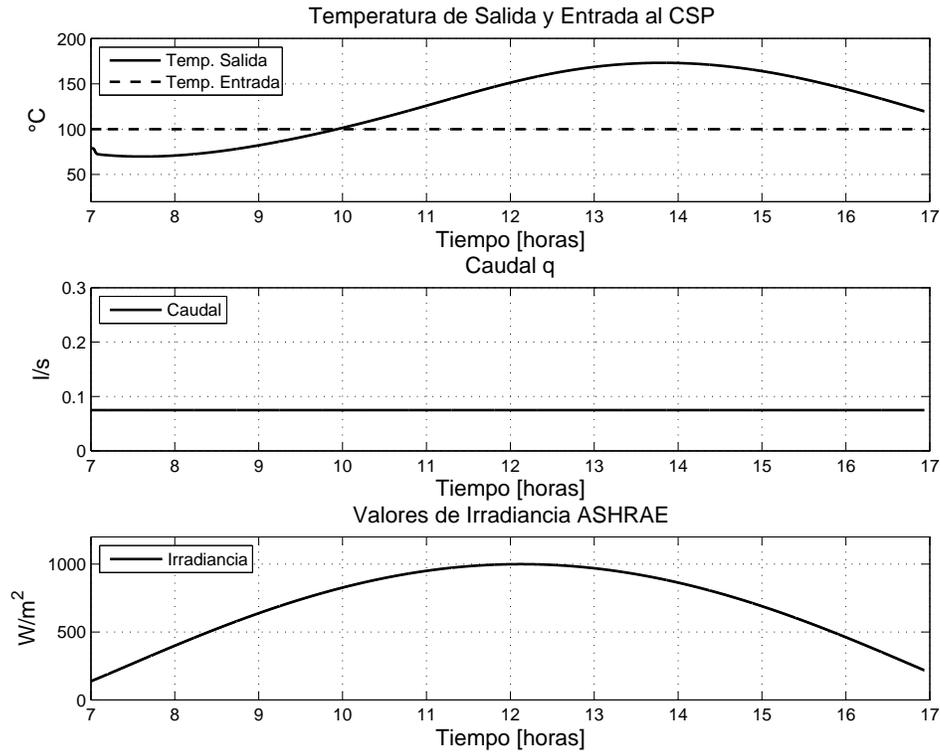


Figura 18: Temperatura de Salida de CSP con perfil ASHRAE.

obtener una representación matemática que represente la variación de la salida con respecto a una variación en la entrada.

Los modelos lineales pueden describirse como una función de transferencia discreta:

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (3.3.10)$$

donde A y B , son polinomios en z^{-1} , la ecuación 3.3.10, se puede representar como:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) \quad (3.3.11)$$

Siendo $u(k-1)$ la entrada al sistema, y $y(k)$ la salida del sistema, el sistema puede

ser representado identificando los coeficientes de los polinomios A y B. Estos parámetros se pueden obtener con el método de mínimos cuadrados.

Varios autores han obtenido modelos lineales a partir de la identificación de los parámetros para fines de control; por ejemplo modelos lineales de bajo orden son comúnmente usados para control adaptativo, mientras que modelos lineales de mayor orden son usados para controladores de ganancia programada (Camacho y otros., 2007).

La figura 17, indica la respuesta de la planta a una señal de entrada, en este caso el caudal de ingreso al circuito de colectores del CSP, mientras el resto de variables de entrada al sistema como la Irradiancia y temperatura ambiente se encuentran constantes. Como se puede apreciar, la respuesta puede ser aproximada a un sistema de primer orden o un sistema de segundo orden sobreamortiguado. Dado que los modelos de primer orden no responden al comportamiento dinámico del sistema, se va a utilizar un modelo de segundo orden sobreamortiguado para obtener una mejor aproximación de la dinámica del proceso.

Para fines de generación eléctrica el rango de funcionamiento de la planta será de 150 a 300°C. Sin embargo los valores actuales de diseño de la CSP de las Fuerzas Armadas ESPE, no permite obtener temperaturas superiores a los 200 °C, y por tanto no es útil para propósitos de generación eléctrica.

A continuación se suponen algunos cambios a las especificaciones de la planta que permiten solucionar este inconveniente:

- Eficiencia óptica del colector igual a 80 %.

- Se suponen tres lazos de colectores, cada uno con una longitud de 16 metros.

- El campo de colectores tiene un total de 48 metros de elementos activos, y seis metros de elementos pasivos.

La respuesta de la planta en condiciones ideales se realiza: introduciendo una entrada escalón, la misma que va desde 0.075 a un litro por segundo, con una temperatura constante de entrada de 100 °C, una Irradiancia constante de 700 [W/m²], temperatura inicial del metal de 300°C y temperatura inicial del fluido de 300 °C (figura 20). A menor caudal la temperatura de salida del sistema aumenta debido a que permanece más tiempo en las zonas activas de los colectores, mientras que si aumenta el caudal disminuye la temperatura de salida.

Para hacer la identificación se utiliza el método de mínimos cuadrados que se detalla a continuación.

Método de Identificación: Mínimos Cuadrados

Se utilizan datos de la salida de temperatura $y(k)$ que se obtiene al ingresar una señal $u(k)$ a partir de la simulación por parámetros distribuidos. La señal de entrada también se aplica al modelo matemático; en este caso una función de transferencia de segundo orden para obtener un error $e(k)$ que debe ser minimizado, para encontrar los valores óptimos de los parámetros del modelo matemático (figura 19).

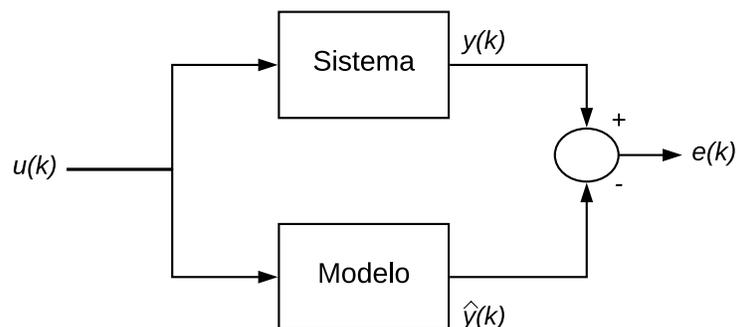


Figura 19: Identificación por mínimos cuadrados.

La ecuación del modelo lineal con los parámetros se expresa como:

$$\hat{y}(k) + a_1\hat{y}(k-1) + a_2\hat{y}(k-2) + \dots + a_n\hat{y}(k-n) = b_1u(k-1) + \dots + b_nu(k-n) \quad (3.3.12)$$

Se puede reescribir matricialmente como:

$$\hat{y}(k) = m(k)\theta \quad (3.3.13)$$

Donde:

- $m(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \ u(k-1) \dots u(k-n)]$, es el regresor.
- $\theta = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_n]^T$ es el vector de parámetros.

El error producido por la estimación se puede escribir como:

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) = y(k) - m(k)\theta \quad (3.3.14)$$

Partiendo de N pares $(y(k) - m(k))$ entre los instantes n y N , se representa matricialmente como:

$$E(N) = Y(N) - M(N)\theta \quad (3.3.15)$$

Donde:

- $E(N) = [e(n, \theta) \dots e(N, \theta)]^T$
- $Y(N) = [y(n) \dots y(N)]^T$
- $M(N) = [m(n) \dots m(N)]^T$

Se busca una solución a θ , definiendo un problema de optimización, estableciendo una función de costo que minimice el error:

$$J(N) = \|E(N, \theta)\|^2 = \sum_{k=n}^N e(k, \theta)^2 \quad (3.3.16)$$

La función de costo J , se puede reescribir como:

$$J(N) = (Y(N) - M(N)\theta)^T (Y(N) - M(N)\theta) \quad (3.3.17)$$

El mínimo es el valor de θ , que hace la función de costo cero:

$$\frac{dJ(\theta)}{d\theta} = 0 \quad (3.3.18)$$

derivando e igualando a cero la ecuación 3.3.17, se tiene:

$$2(M(N)\theta - Y(N))^T M(N) = 0 \quad (3.3.19)$$

La solución de los parámetros que minimiza J es:

$$\theta = [M^T(N)M(N)]^{-1} M^T(N)Y(N) \quad (3.3.20)$$

Identificación

El modelo seleccionado para la identificación por mínimos cuadrados es un modelo de segundo orden:

$$G(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (3.3.21)$$

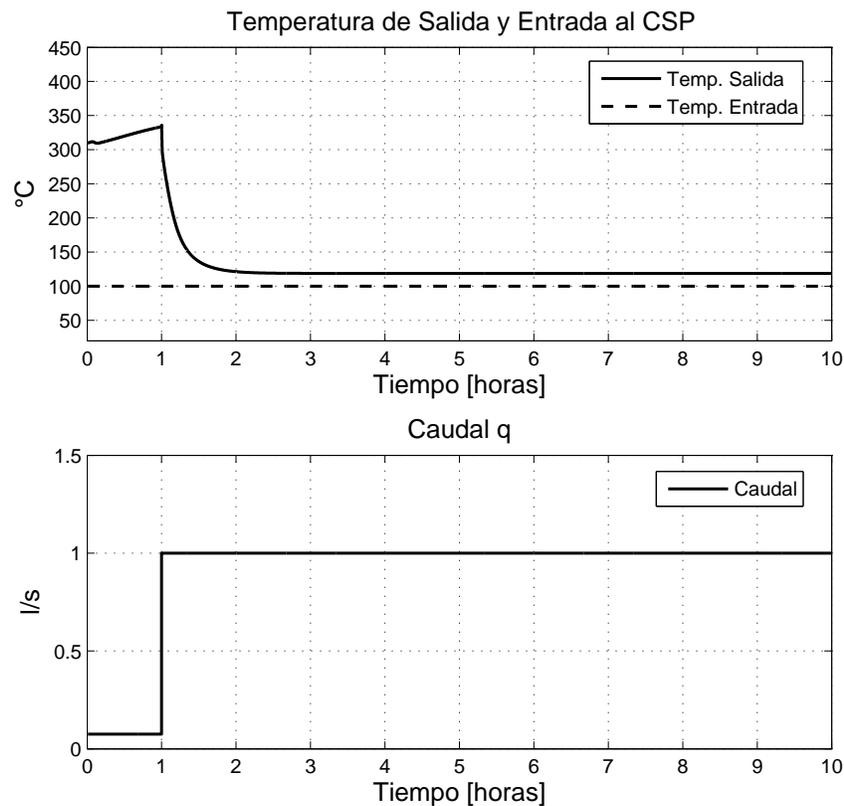


Figura 20: Respuesta de CSP a una entrada escalón.

Con los datos obtenidos de la simulación, presentados en la figura 20, se desarrolla un código en Matlab[®] para identificar el modelo de segundo orden. Tomando en cuenta trabajos previos descritos en (Rubio y otros., 1990), se selecciona un periodo de muestreo de 36 segundos, y se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 6:

Por lo tanto, la función de transferencia discreta del modelo lineal de segundo orden queda expresada como:

Tabla 6*Parámetros de modelo lineal de segundo orden.*

Coeficiente	Valor
a_1	0,9041
a_2	0,04771
b_1	-4,293
b_2	-1,44

$$G(z^{-1}) = \frac{-4,293z^{-1} - 1,44z^{-2}}{1 - 0,9041z^{-1} - 0,04771z^{-2}} \quad (3.3.22)$$

El código para la obtención de estos parámetros se detallan en el Anexo C.

3.4. Estrategia de Control

El problema de control consiste en que no se puede manipular la fuente principal de energía, es decir la Irradiancia solar. La única variable de entrada al sistema que se puede manipular es el caudal del aceite térmico que circula por el campo de colectores. Este control debe contar con un sistema de seguimiento que cambie la posición de los CCP para asegurar valores máximos de radiación que se puedan aprovechar.

El control pretende mantener la temperatura de salida del aceite de forma constante a pesar de las variaciones y perturbaciones del sistema, y que este logre adaptarse convenientemente a otro punto de funcionamiento (Flor Unda, 2013).

Se propone utilizar la estrategia de control predictiva al CSP con los parámetros mostrados anteriormente, en específico se usa la metodología DMC. La ley de control a aplicar se

representa en la siguiente figura:

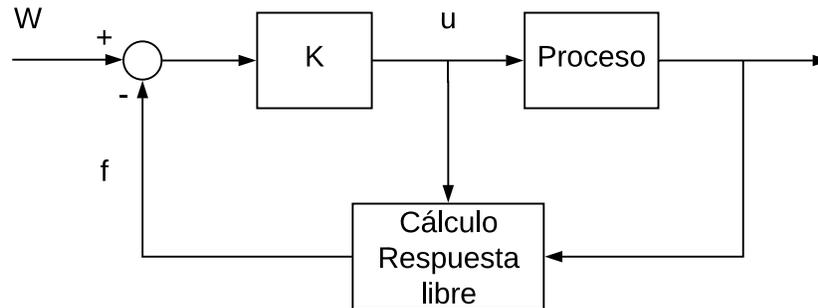


Figura 21: Ley de Control DMC.
Fuente: (Camacho y Bordons, 2004)

Como se puede observar en la figura 21, el problema de control se resuelve calculando la matriz dinámica G , que contiene los coeficientes g_i obtenidos a partir de la respuesta del proceso ante una entrada escalón. Posteriormente se calcula K , que es un vector constante que nos permite calcular las variaciones de salida de la variable manipulada, a partir de la referencia y la respuesta libre del sistema. Solo se envía al proceso la primera variación de control, mientras que el vector de la respuesta libre f se calcula en cada instante de tiempo con los valores anteriores de u , los coeficientes g_i y el valor actual de la salida del proceso.

3.4.1. Valor de Matriz Dinámica

Se usa el modelo de la respuesta de la planta al escalón a partir de la función de transferencia representada por 3.3.22, para obtener los coeficientes g_i . Estos coeficientes representan la figura 22.

La matriz dinámica G contiene los valores de g_i , con un tiempo de muestreo de 36 segundos, y se describe a través de la ecuación 2.5.5. Se considera un horizonte de predicción de 40 ($p = 40$) y un horizonte de control de 10 muestras ($m = 10$). Los valores de la matriz G

se detallan en el Anexo D.

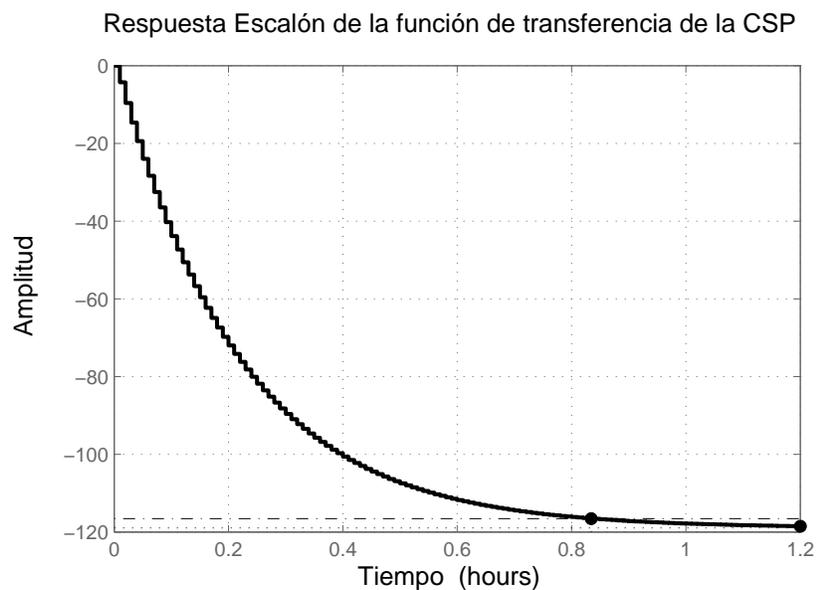


Figura 22: Respuesta al escalón del modelo lineal.

Con la matriz dinámica G , se obtiene la matriz $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$, donde K corresponde la primera fila de esta matriz, y de esta manera la ley de control queda descrito por la ecuación 2.5.10.

3.4.2. Algoritmo Controlador DMC

Con la matriz dinámica obtenidos a partir del modelo seleccionado, se realiza un programa en Matlab® donde el controlador DMC calcula la acción de control a la planta CSP, representada por el modelo de parámetros distribuidos y también para el modelo de segundo orden. La figura 23 representa el diagrama de flujo del algoritmo.

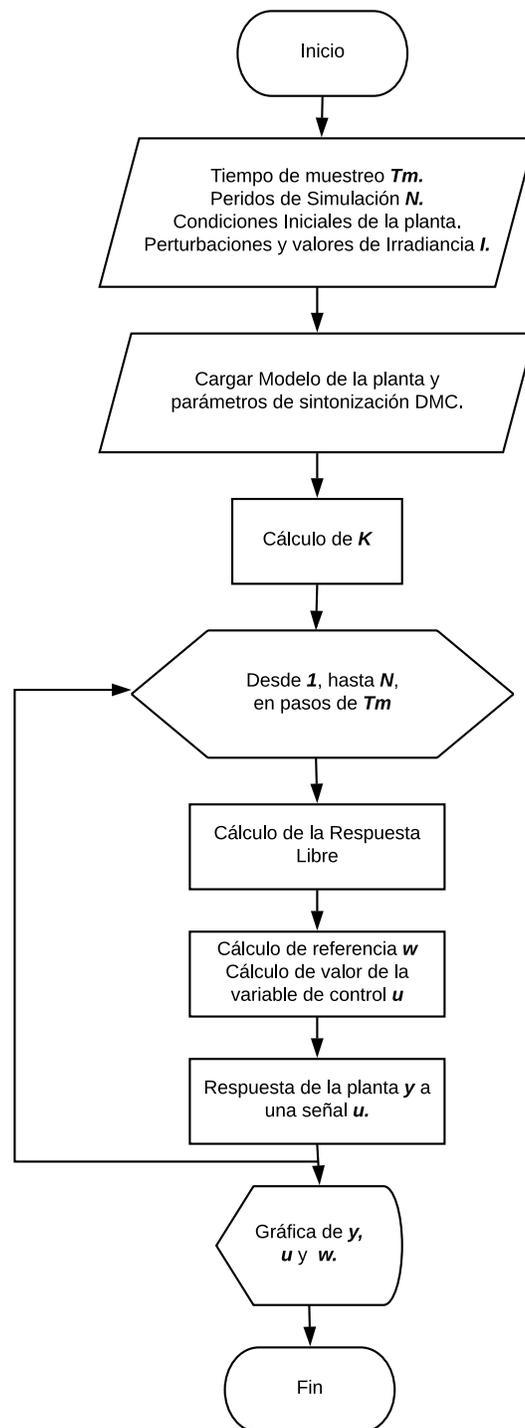


Figura 23: Diagrama de flujo del controlador DMC.

La respuesta libre se calcula en cada instante de tiempo con la ecuación 2.5.4. Como se mencionó en el capítulo anterior, el valor de referencia w , no necesariamente tiene que ser el valor real de referencia r . El valor de referencia se puede aproximar suavemente por medio de un sistema de primer orden representado por la ecuación 2.5.8. El sistema de primer orden es una función de transferencia racional, y se representa como:

$$w(z^{-1}) = \frac{(1 - \alpha)z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} r(z^{-1}) \quad (3.4.1)$$

Los valores de referencia futuros $r(z^{-1})$ se toman en tamaños del horizonte de predicción p , estos valores son filtrados para obtener una nueva trayectoria donde el valor de α es un parámetro entre cero y uno, entre más cerca este de uno se tiene una aproximación más suave.

3.4.3. Restricción

En la práctica, todos los procesos están limitados a un rango de operación o velocidad de respuesta de los actuadores y a límites en la salida de la planta. Muchos algoritmos predictivos tienen en cuenta estas restricciones, por lo cual han tenido un gran éxito en la industria (Camacho y otros., 1997).

En este caso se utilizará una restricción a la amplitud de la señal de control, debido a que las propiedades físicas de la planta en estudio solo se puede aplicar un rango limitado de caudal :

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$$

Donde $u_{min} = 0,005 [l/s]$ y $u_{max} = 2,5 [l/s]$, cuando la señal de control sobrepasa estos límites, simplemente se saturan con sus valores de frontera. Esta restricción se implementa fácilmente en el algoritmo de control con un condicional.

3.4.4. Parámetros de Sintonización

Esfuerzo de control λ

Los controladores de la familia MPC, no disponen de métodos para seleccionar los factores de ponderación. Los métodos para encontrar los valores apropiados de los pesos, están basados en procedimientos experimentales, técnicas heurísticas, y de forma analítica (Trigo, 2016), y actualmente se considera un campo de estudio abierto.

El método de sintonización aplicado es experimental, por lo cual, se realizan varias pruebas en simulación con diferentes valores de λ para así obtener un valor que se ajuste a los requerimientos.

Se han propuesto 4 valores de λ : 10, 100, 1000 y 10000 respectivamente. Las simulaciones se realizaron considerando el modelo de la planta de segundo orden representado por la ecuación 3.3.22 para obtener la respuesta de la planta, con $p = 40$ y $m = 10$, una temperatura inicial de 80°C , la referencia w se calcula con $\alpha = 0,5$ en un tiempo de dos horas y . Los resultados se presentan en la figura 24.

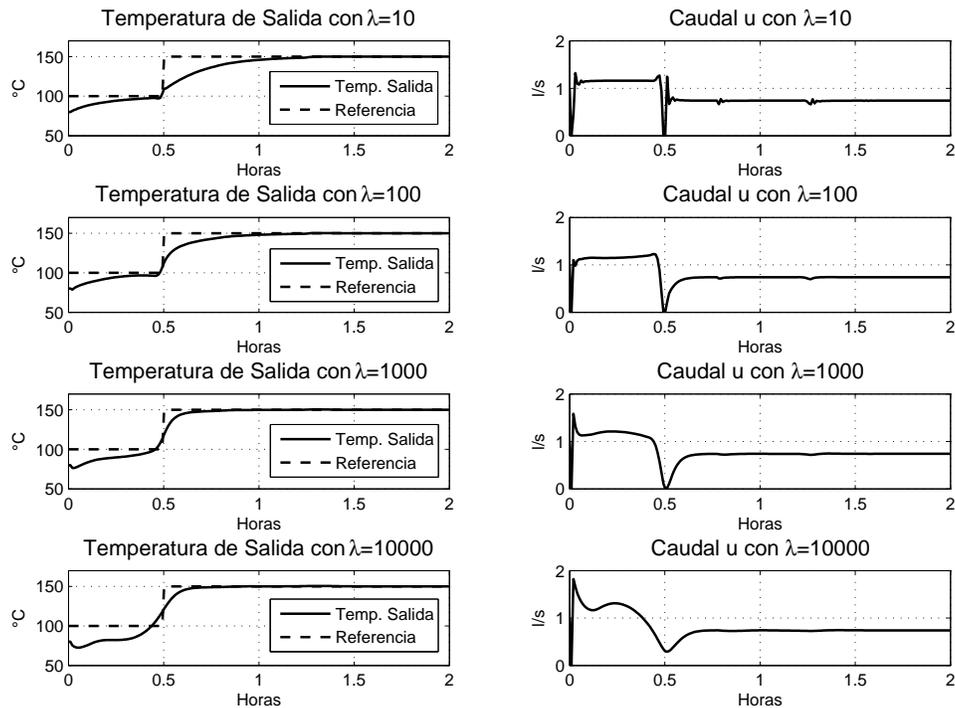


Figura 24: Sintonización con diferentes valores de λ .

Como se ha visto hasta ahora la planta CSP seleccionada es un proceso lento, que tiene un tiempo de estabilización de alrededor de una hora, el objetivo es contrarrestar este retardo, anticipando la acciones de control. La figura 24 muestra que para valores pequeños de λ , las acciones de control son rápidas, sin embargo esto hace que el actuador del sistema realice cambios bruscos, comprometiendo su funcionamiento. Cuando λ tiene valores grandes, las acciones de control son mas suaves y permite que ante cambios de referencia en el futuro se anticipe las acciones de control.

En este proyecto de investigación se utiliza un valor de $\lambda = 10000$, puesto que el controlador tiene más anticipación a cambios de referencia futuros, las variaciones de la señal de control se suavizan y se encuentran en el rango de operación del actuador.

Factor de amortiguamiento α en la trayectoria de referencia

Como se mencionó anteriormente el parámetro α se puede ajustar para obtener una referencia más suave con respecto a la referencia real. Anteriormente el valor de ponderación λ se obtuvo para todas las simulaciones con un valor constante de $\alpha = 0,5$. Se seleccionó este valor considerando una aproximación suave media, a la referencia futura conocida.

3.5. Conclusiones del Capítulo

En este capítulo se revisaron los parámetros físicos que componen la CSP de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a partir de estos datos se desarrolló el modelo por parámetros distribuidos, incluyendo todas las variables que influyen en la dinámica del proceso, se sugirió cambios a estos parámetros para poder obtener valores de temperatura aceptables para la generación eléctrica. A partir del modelo obtenido se identificó un modelo lineal de segundo orden, utilizando el método de mínimos cuadrados, este modelo aproximado es de utilidad para el desarrollo de la estrategia DMC. A continuación se diseñó el controlador DMC, utilizando la estrategia de control predictivo, e implementando un algoritmo que permita simular el sistema controlado para validar su funcionamiento. En este controlador se consideraron las restricciones propias de la planta y se realizó una sintonización experimental. El controlador se simulará en el siguiente capítulo en diferentes escenarios, en donde se tomará en cuenta las perturbaciones inherentes a este sistema. El controlador DMC diseñado se aplica a la planta representada por el modelo de parámetros distribuidos y a la aproximación lineal.

Capítulo 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el controlador diseñado y sintonizado, se realizaron códigos en Matlab[®] que permiten obtener pruebas por simulación, donde se evalúa el desempeño del controlador.

En primer lugar se simula el controlador DMC con la planta en lazo cerrado, donde la planta es representada por el modelo lineal de segundo orden, aquí el controlador se evalúa frente a cambios en la referencia de subida y bajada, y ante una perturbación que se añade al modelo de la planta en un tiempo determinado. En segundo lugar se simula el controlador utilizando el modelo por parámetros distribuidos, se evalúa su desempeño frente a cambios en la referencia con irradiancia constante y utilizando el perfil de radiación por el método ASHRAE, al final el sistema es simulado con perturbaciones en el perfil de radiación.

4.1. Evaluación del DMC con el Modelo Lineal de segundo orden

4.1.1. Evaluación de la respuesta a un escalón

El desempeño de un sistema de control, se especifica frecuentemente en términos de la respuesta transitoria a una entrada escalón. Para evaluar la respuesta transitoria del sistema controlado, se utilizan los índices presentados a continuación (Nise y Romo, 2002):

1. Tiempo de asentamiento, T_s : Es el tiempo necesario para que las oscilaciones amortiguadas de la respuesta transitoria alcancen y permanezcan a no mas de el $\pm 2\%$ del estado estable.
2. Tiempo de levantamiento, T_r : Tiempo necesario para que la forma de onda pase del 1 % al 90 % del valor final.
3. Sobrepasso en porcentaje, $\%OS$: Cantidad en porcentaje para que las oscilaciones amortiguadas de la respuesta transitoria sobrepase el valor en estado estable.

Los resultados de la simulación se presentan en la figura 25, cuando la referencia varía en un escalón de subida, considerando como condiciones iniciales cuando el sistema está en estado estable. La Tabla 7 presenta los índices de evaluación correspondientes a los resultados obtenidos y los valores de la respuesta en lazo abierto presentado en la figura 22.

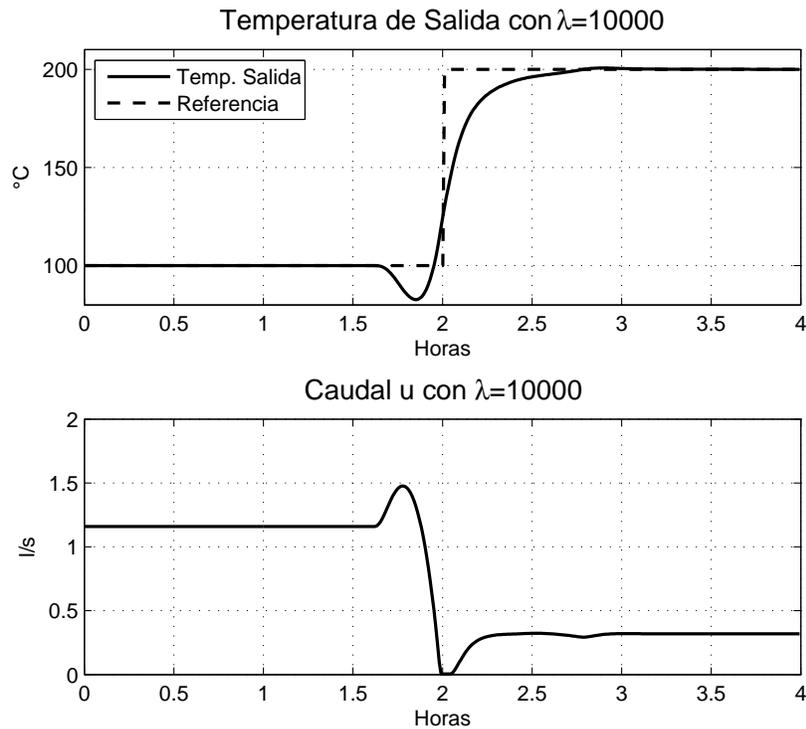


Figura 25: Respuesta de CSP controlado a un escalón de subida con planta lineal de segundo orden.

Tabla 7

Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de subida con planta lineal de segundo orden.

Indices	Sistema controlado	Sistema en lazo abierto
T_s [min]	47,54	50,1
T_r [min]	20.42	28,1
%OS	0	0

De igual manera, la figura 26 representa los resultados de simulación cuando la referencia varía en un escalón de bajada, los valores de los índices se detallan en la Tabla 8:

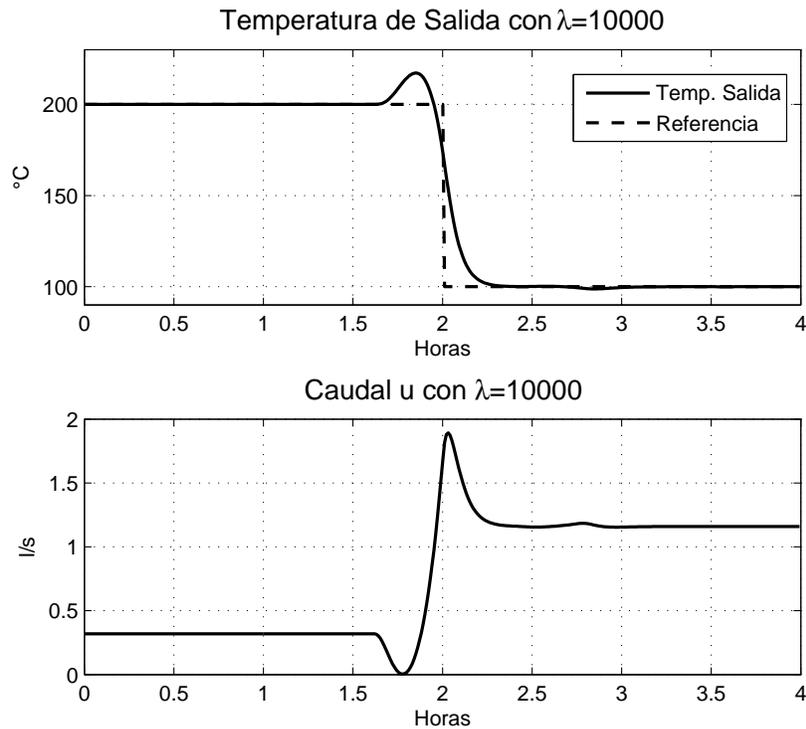


Figura 26: Respuesta de CSP controlado a un escalón de bajada con planta lineal de segundo orden.

Tabla 8

Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de bajada con planta lineal de segundo orden.

Indices	Sistema controlado	Sistema en lazo abierto
T_s [min]	42,7	50,1
T_r [min]	11,4	28,1
%OS	0	0

A partir de los resultados presentados en la Tabla 7 y Tabla 8, se observa que para el modelo lineal de la planta con control DMC, el tiempo de asentamiento y levantamiento disminuyen con respecto a la respuesta escalón en lazo abierto, en ambos casos no existe

sobrepaso en porcentaje. También se observa que para cambios en la referencia en bajada el sistema llega a establecerse más rápido que cuando existen cambios de subida.

La figura 27 muestra los resultados de la simulación del sistema controlado en un tiempo de 10 horas, como se puede observar el controlador DMC anticipa correctamente los cambios de la referencia, tanto de subida como de bajada, y aplica acciones de control anticipadas que permiten menorar el tiempo de asentamiento.

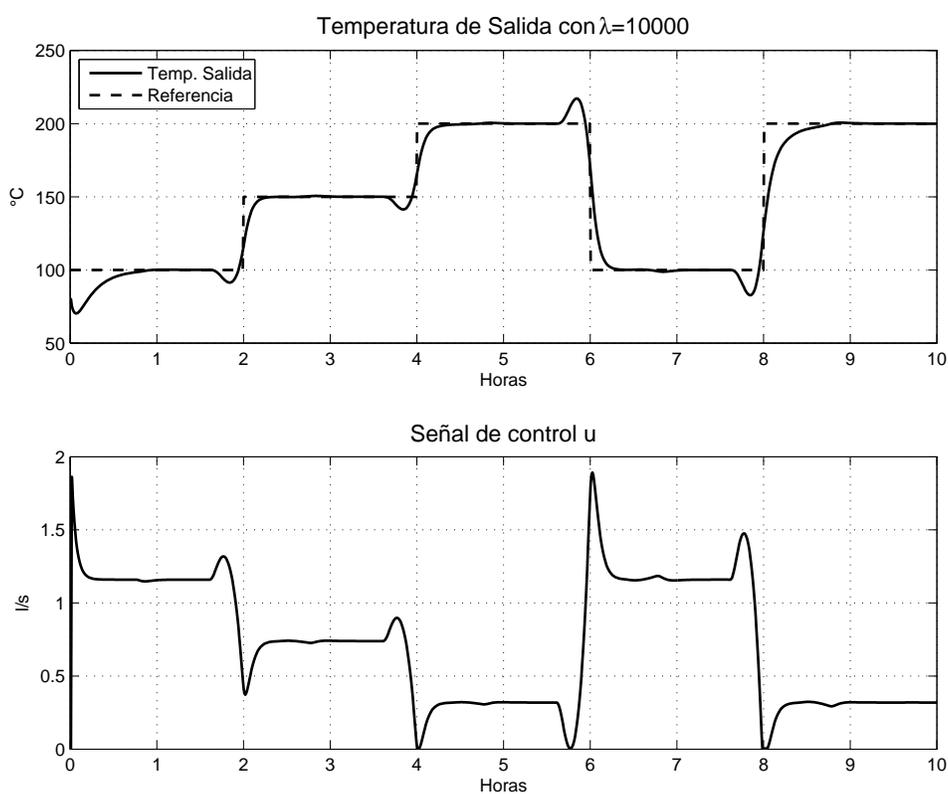


Figura 27: Modelo lineal de la planta con control DMC.

4.1.2. Evaluación a perturbaciones externas al modelo lineal

A continuación se incluye una perturbación que se genera fuera del sistema, esta se añade a la salida de la planta controlada. La figura 28 muestra los resultados obtenidos de la simulación cuando se añade una perturbación de $\pm 10^\circ\text{C}$, en $t=1$ y 3 horas respectivamente :

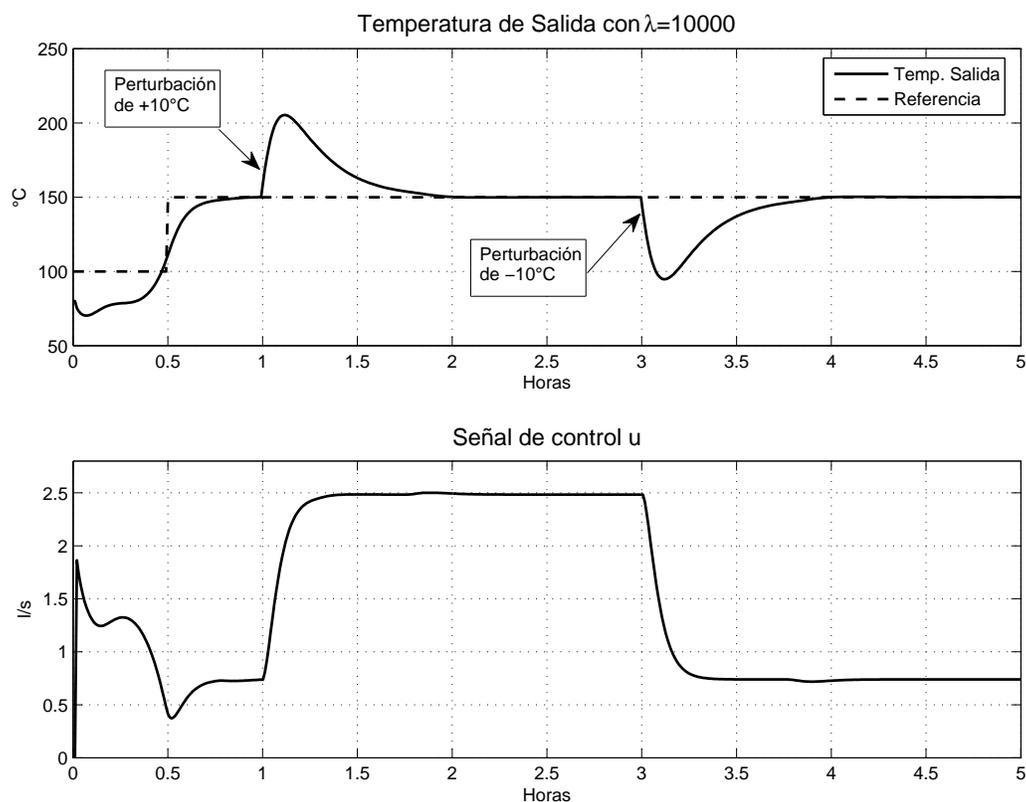


Figura 28: Respuesta del modelo lineal de la planta con control DMC y perturbación externa.

Como se puede observar la acción de control responde adecuadamente ante la perturbación, la señal de control incluso llega a saturarse en su límite máximo debido a las restricciones del sistema.

Es muy común que en procesos controlados las perturbaciones sean variables que se pue-

dan medir, en el caso de la planta en estudio: Irradiancia, temperatura ambiente y la temperatura de entrada del fluido. Los controladores MPC, pueden añadir modelos de perturbaciones a la predicción, y deben ser representados por un modelo matemático (Camacho y Bordons, 2004).

En la presente investigación no se disponen modelos que representen las perturbaciones medibles, sin embargo, se observa que el control DMC propuesto es eficaz.

El código de simulación del sistema controlado con el modelo lineal está disponible en el Anexo E.

4.2. Evaluación del DMC con el Modelo de parámetros distribuidos

4.2.1. Evaluación de la respuesta a un escalón

A continuación se evalúa el controlador DMC utilizando la representación de la planta por el modelo de parámetros distribuidos, este modelo es completo y captura la dinámica del proceso.

Los índices de evaluación correspondientes a la figura 29, se obtiene cuando la referencia varía en un escalón de subida, se considera como condición inicial que el sistema se encuentra en estado estable a una temperatura de 100 °C, una irradiancia constante de 700 $[W/m^2]$ y temperatura ambiente de 25 °C.

La Tabla 9 presenta los índices de evaluación correspondientes a los resultados obtenidos, junto con los valores de la respuesta en lazo abierto simulado con el modelo de parámetros

distribuidos presentado en la figura 20.

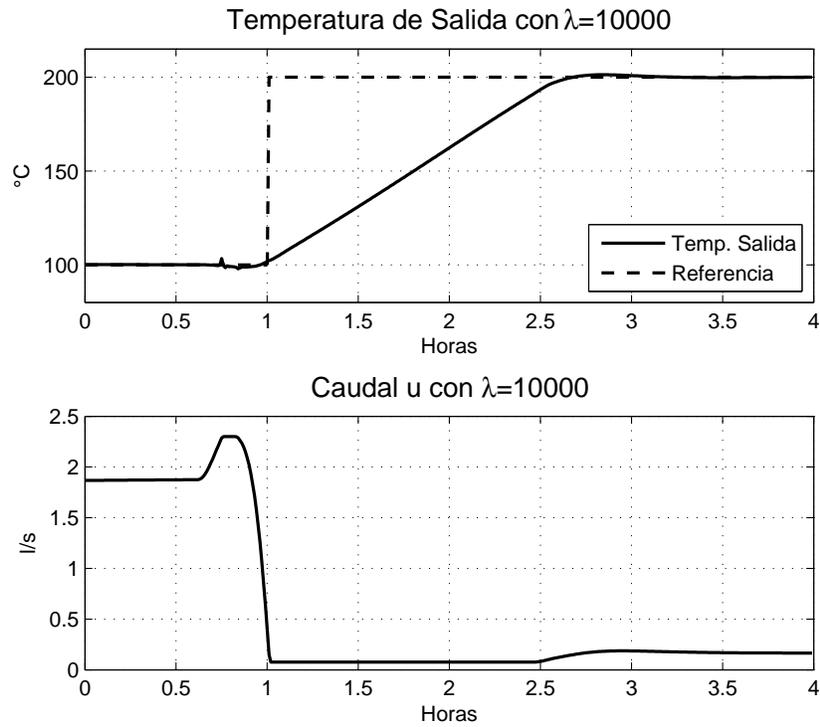


Figura 29: Respuesta de CSP controlado a un escalón de subida con modelo por parámetros distribuidos.

Tabla 9

Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de subida con el modelo por parámetros distribuidos.

Indices	Sistema controlado	Sistema en lazo abierto
T_s [min]	106,8	90
T_r [min]	77,4	36,18
%OS	1	0

De igual manera la figura 30, corresponde a la simulación con las condiciones iniciales mencionadas anteriormente y cuando el sistema se encuentra en estado estable a una tem-

peratura de 200 °C, en este caso la referencia varía en un escalón de bajada. La Tabla 10 contiene el valor de los índices de evaluación, junto con los valores de la respuesta en lazo abierto:

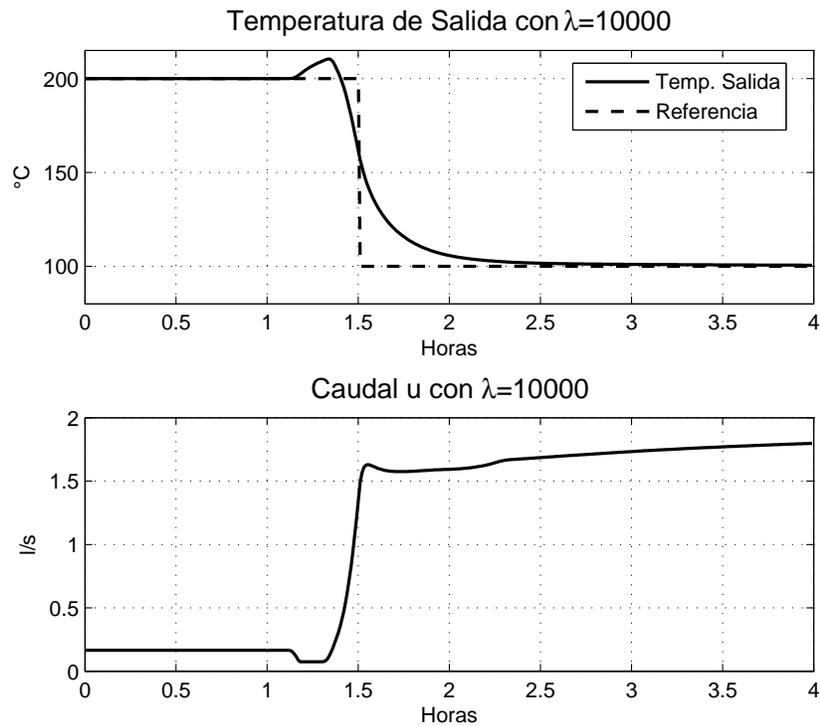


Figura 30: Respuesta de CSP controlado a un escalón de bajada con modelo por parámetros distribuidos.

Tabla 10

Indices de respuesta de CSP controlada y en lazo abierto a un escalón de bajada con el modelo por parámetros distribuidos.

Indices	Sistema controlado	Sistema en lazo abierto
T_s [min]	81,7	90
T_r [min]	17.4	36,18
%OS	0	0

Con los resultados presentados en la Tabla 9 y Tabla 10, se observa que, cuando existe un cambio de referencia en bajada, el tiempo de asentamiento y levantamiento disminuyen con respecto a la respuesta escalón en lazo abierto, en cambios de referencia de subida, se obtiene tiempos más grandes de estabilización y de subida. En ambos casos el controlador adelanta sus acciones a los cambios de referencia y está sujeto a las restricciones de la variable de control.

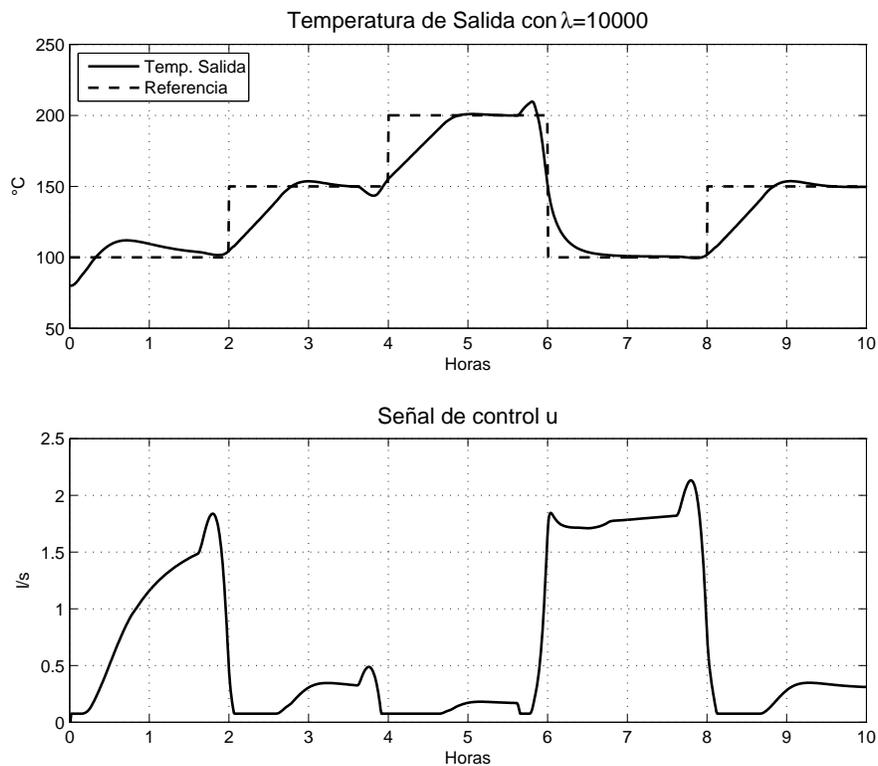


Figura 31: Respuesta del modelo por parámetros distribuidos de la planta con control DMC.

La figura 31 muestra los resultados de la simulación del sistema controlado en un tiempo de 10 horas, considerando una irradiancia constante de $700 [W/m^2]$, temperatura ambiente de $25\text{ }^\circ\text{C}$, una temperatura de entrada del fluido de $90\text{ }^\circ\text{C}$, y una temperatura inicial de $80\text{ }^\circ\text{C}$

. Como se puede observar el controlador DMC aplica acciones de control anticipadas a los cambios de referencia.

4.2.2. Simulación con perfil de radiación ASHRAE

Hasta ahora se ha realizado simulaciones con valores de irradiancia constante, sin embargo la irradiancia es una variable que influye directamente en el valor de temperatura a la salida del campo de colectores.

En el anterior capítulo se obtuvo un perfil de radiación para cielos despejados y superficies horizontales por el método ASHRAE, los valores de irradiancia obtenidos se calcularon cuando el colector se mantiene fijo con el plano de apertura perpendicular al vector de irradiación directa del medio día.

La figura 32 muestra la simulación con el perfil de radiación presentado en la Tabla 4, con diferentes valores de referencia, considerando una temperatura ambiente de 25°C , una temperatura inicial de 80°C y temperatura de entrada de 90°C al campo de colectores. A partir de la simulación, se puede observar que el controlador DMC, ajusta adecuadamente las acciones de control ante los diferentes valores del perfil de radiación. Cerca del medio día se obtiene el valor máximo de irradiancia y este comienza a decrecer en las siguientes horas, se puede observar que si la irradiancia disminuye el caudal también lo hace para mantener la temperatura de salida en el valor de referencia.

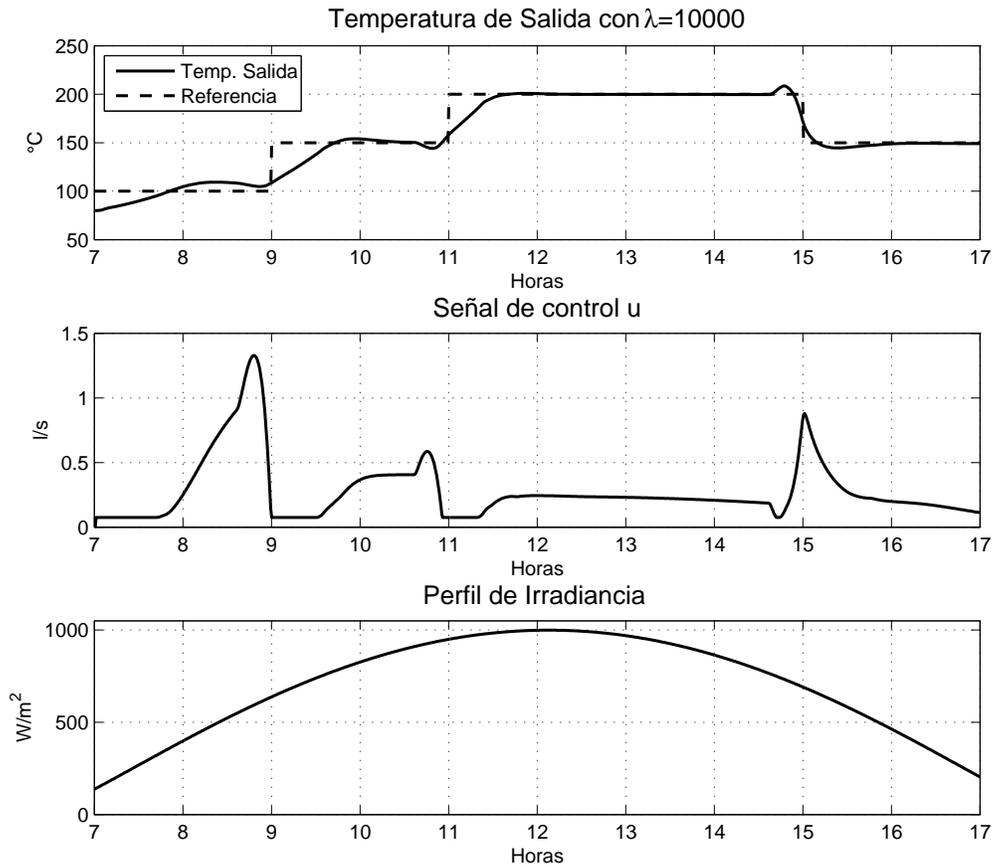


Figura 32: Respuesta del modelo por parámetros distribuidos de la planta con control DMC y valores de irradiancia ASHRAE.

4.2.3. Simulación con perturbación en al perfil de radiación ASHRAE

El valor de irradiancia presenta un alto grado de incertidumbre, especialmente en días de nubosidad parcial es difícil predecir con exactitud en que momento una nube bloqueará la radiación solar directa sobre el campo de colectores (Morales Caro, 2013). Para poder estimar el efecto de perturbaciones por paso de nubes pasajeras sobre el campo de colectores, se presenta un escenario donde nubes puntuales bloquean el 50 % de irradiancia, estas pertur-

baciones se dan en $t = 10:00$ y $14:30$ (hora local), y tienen una duración de 30 minutos. La figura 33 muestra los resultados obtenidos de la simulación en las condiciones mencionadas anteriormente:

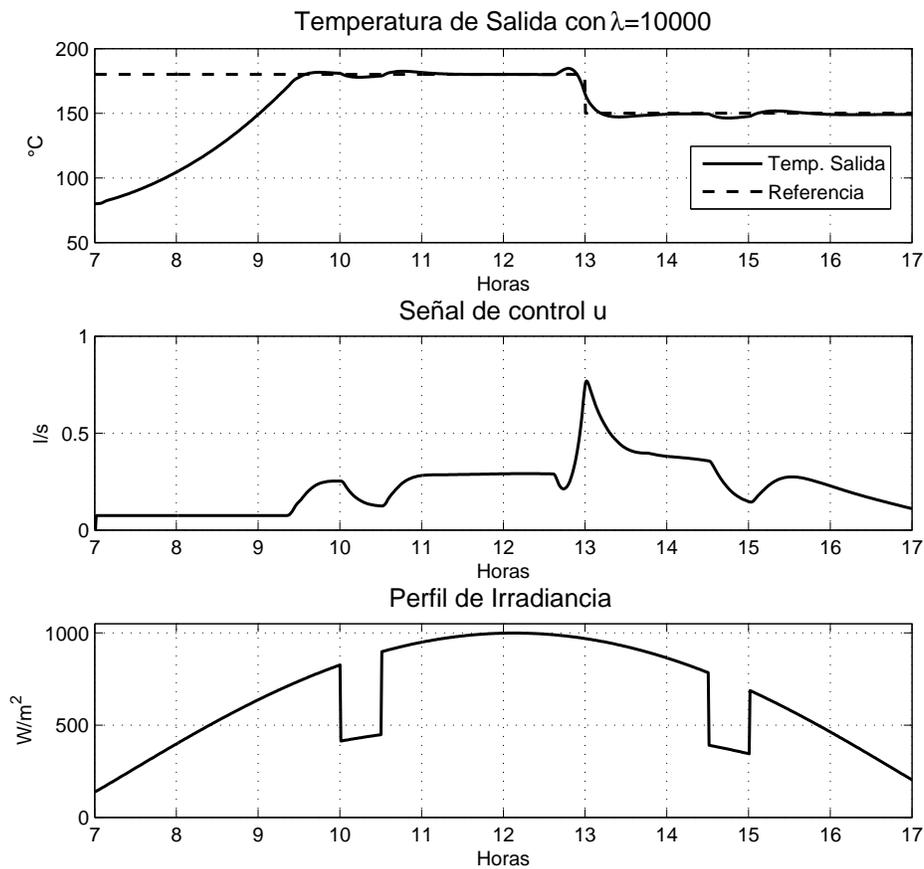


Figura 33: Respuesta del modelo por parámetros distribuidos de la planta con control DMC y valores de irradiancia ASHRAE con perturbaciones puntuales.

Con los resultados obtenidos, se observa que el controlador DMC, responde adecuadamente ante cambios bruscos de irradiancia. Cabe mencionar que en las simulaciones presentadas, se ha considerado una temperatura de entrada constante al campo de colectores, esta variable se asegura con el sistema de almacenamiento térmico, este sistema es de vital importancia ya

que amortigua la irradiancia solar fluctuante. El código de simulación del sistema controlado con el modelo de parámetros distribuidos está disponible en el Anexo F.

4.3. Conclusiones del Capítulo

En este capítulo se han desarrollado varias simulaciones con resultados satisfactorios, comprobando que el controlador DMC es adecuado para la dinámica del proceso. Es evidente que el modelo por parámetros distribuidos permite obtener un abanico grande de escenarios de simulación y representa adecuadamente la compleja dinámica del proceso, en el caso de su aproximación lineal cabe resaltar que el modelo obtenido permitió una fácil implementación del controlador. El controlador DMC proporciona una señal de control suave, condición que es favorable en la vida útil del actuador, además proporciona una fácil implementación de restricciones en la señal de control, que en la práctica es útil al momento de implementar el controlador.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Gracias a las condiciones geográficas, topográficas y climatológicas únicas del Ecuador, el potencial solar disponible es elevado. Esta realidad ha pasado desapercibida por muchos años, a pesar de que en muchas partes del mundo la utilización de energías renovables ya están en una etapa de producción industrial. El conocimiento y la experimentación de diferentes técnicas alternativas de producción eléctrica es de vital importancia no solo para ayudar al medio ambiente, sino que contribuyen al desarrollo económico y social del país. Se debe incentivar proyectos que aprovechen este recurso ya que pueden satisfacer diferentes necesidades de la comunidad y la industria.
- Se han presentado dos modelos que simulan el comportamiento dinámico de la central termosolar por concentración. El modelo por parámetros distribuidos es ampliamente reconocido en la literatura, y describe adecuadamente las diferentes variables que influyen en el proceso, toma en cuenta parámetros como: irradiancia, temperatura am-

biente, características técnicas de construcción y, de fluido, etc, y permite que la planta se simule en diferentes escenarios. Cuando se linealiza este modelo es posible una aproximación adecuada del comportamiento en un punto de operación específico, y de esta manera se tiene una idea del comportamiento de la planta.

- Como se ha podido observar, el control predictivo basado en matriz dinámica ofrece una solución a este tipo de sistemas, a pesar de que la fuente principal de energía no es regulable y es intermitente, se asegura una temperatura a la salida del campo de colectores que puede ser aprovechada para la generación eléctrica. Sin embargo, ya que el controlador DMC depende de modelo matemático, y en el caso de este tipo de plantas, la respuesta es diferente en distintos puntos de operación, esta técnica de control mejora su desempeño cuando se aplica en conjunto con técnicas de control adaptativas, que permitan obtener los parámetros del modelo y de sintonización.
- Se ha validado el controlador cuando el valor de la referencia varía en un escalón, sin embargo estas variaciones solo ponen a prueba la dinámica del sistema controlado, y posiblemente no sea el comportamiento real, dado que como se mencionó anteriormente se deben considerar los diferentes puntos de operación del sistema.
- La simulación del sistema con parámetros distribuidos y control DMC, permite obtener comportamientos con diferentes valores de radiación, es importante asegurar esta variable, y esto se logra con la implementación de un sistema de seguimiento solar controlado.
- La estrategia de control DMC puede ser fácilmente implementada en un caso multi-

variable, sin la necesidad de una difícil re-escritura del código propuesto. También se puede mejorar la predicción si se introduce un modelo de perturbaciones medibles al sistema, que de igual manera no requiere mayor trabajo en el código realizado.

Recomendaciones

- Se debe hacer una investigación completa de la capacidad solar en el Ecuador, es necesario obtener perfiles de radiación reales, que de esta manera sea posible simular y analizar el comportamiento del sistema para días con alta, media y baja radiación solar.
- Se recomienda que para trabajos futuros el controlador propuesto, se compare con diferentes estrategias de control tanto clásicas como avanzadas, y así se podrá realizar una retroalimentación que permita mejorar el controlador DMC.
- Con los resultados obtenidos, se recomienda realizar mantenimiento y mejoras mecánicas en la central termosolar de la Universidad de las Fuerzas Armadas. El pleno funcionamiento de esta planta da paso a la investigación de sistemas de control y automatización que se pueden aplicar a este tipo de procesos.

Referencias

ACCIONA, *Energías Renovables* (2015), URL www.acciona.com/es/energias-ren.

Agency, E., *The Future for Renewable Energy 2: Prospects and Directions*, Routledge (2013).

Álvarez, M., *Energía solar termoelectrica*, en Plataforma Solar de Almería-CIEMAT, Bd. 22 (2006): 2.

ANDES, *Consejo Mundial de Energía resalta liderazgo de Ecuador en políticas energéticas* (2014), URL www.andes.info.ec/es/noticias/economia/1/31056/.

AquaySol, *Los Tubos de vidrio al vacío* (2015), URL www.aquaysol.com/funcionamiento.html.

Asamblea Constituyente, *Constitución de la Republica del Ecuador* (2008), URL www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion_de_bolsillo.pdf.

ASHRAE, *American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers*, en Inc.: Atlanta, GA, USA, (2009).

Brosilow, C. y Joseph, B., *Techniques of model-based control*, Prentice Hall Professional (2002).

- Busso, A., y otros., *Ensayos de un concentrador solar cilindro parabólico con fluido caloportador*, en *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Bd. 13 (2009): 6.
- Camacho, E. F. y Alba, C. B., *Model predictive control*, Springer Science & Business Media (2013).
- Camacho, E. F. y Bordons, C., *Control predictivo: Pasado, presente y futuro*, en *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Bd. 1 (2004), 3: 5–28.
- Camacho, E. F., y otros., *Modelling and simulation of a solar power plant with a distributed collectors system*, en *Power Systems: Modelling and Control Applications*, S. 321–325, Elsevier (1989).
- Camacho, E. F., y otros., *Advanced control of solar plants*, Springer Verlag (1997).
- Camacho, E. F., y otros., *A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part I: Modeling and basic control approaches*, en *Solar Energy*, Bd. 81 (2007), 10: 1240–1251.
- Camacho, E. F., y otros., *Control of solar energy systems*, Springer London Limited (2014).
- CIEMAT, *Plataforma Solar de Almería (PSA)* (2007a), URL www.psa.es/es/gen/objetivos.php.
- CIEMAT, *Plataforma Solar de Almería (PSA)* (2007b), URL www.psa.es/es/instalaciones/.
- Clarke, D. W., *Application of generalized predictive control to industrial processes*, en *IEEE Control systems magazine*, Bd. 8 (1988), 2: 49–55.

CONELEC, *Atlas Solar con fines de Generación Eléctrica*, en , (2008), URL www.biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf.

Cspworld, *CSP World Map* (2015), URL <http://cspworld.org/cspworldmap>.

Cutler, C. R. y Ramaker, B. L., *Dynamic matrix control. A computer control algorithm*, en *joint automatic control conference*, 17, S. 72 (1980).

de Juana Sardón, J. M., *Energías renovables para el desarrollo*, Editorial Paraninfo (2003).

Dossier, S., *SOLAR*, en Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, (2014): 10.

Duffie, J. A. y Beckman, W. A., *Solar engineering of thermal processes*, en , (1980).

Energía Solar, *Energía solar térmica de alta temperatura* (2015), URL www.solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura.

Escalante, P. B. y Gutiérrez, L. V., *Esquema de control basado en funciones PID en serie con un controlador por adelantado para la regulación de un campo de colectores solares*, en *Minería, industria y medio ambiente en la cuenca mediterránea:[homenaje al prof. Antonio Marañés]*, S. 149–160, Servicio de Publicaciones (1999).

Espejo Marín, C., *Los nuevos paisajes de la energía solar: las centrales termosolares*, en , (2010).

Flor Unda, O. C., *Control predictivo basado en modelo de un campo de colectores solares tipo acurex* (2013).

Garcia, C. E., y otros., *Model predictive control: theory and practice a survey*, en *Automatica*, Bd. 25 (1989), 3: 335–348.

IDAIE, *Energía Solar Térmica*, en Guía práctica sobre instalaciones centralizadas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) en edificios de viviendas Guía práctica sobre instalaciones centralizadas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) en edificios de viviendas, (2007): 59.

INER, *Energía Solar* (2016a), URL www.iner.gob.ec/solar/.

INER, *Escenarios de prospectiva energética para Ecuador a 2050* (2016b), URL www.plataforma.iner.ec/.

Kaltz, A., *Distributed Collector System Plant Construction Report, IEA/SSPS Operating Agent DFVLR, Cologne*, en *Neural Networks for Chemical Engineers*, Editor A. Bulsari, (1982): 572–591.

Linkers, D. A. y Mahfonf, M., *Advances in Model-based predictive control, chapter Generalised predictive control in clinical anaesthesia* (1994).

MEER, *Plan de Eficiencia Energética 2016-2035* (2017), URL <http://dmee.com.ec/plan-nacional-de-eficiencia-energetica/>.

Mera Pérez, M. A., y otros., *Implementación y ensayos de una central solar térmica de 18 kWt para calefacción de una vivienda experimental* (2016).

Morales Caro, R. A., *Diseño de estrategias de control predictivo supervisor para centrales solares termoeléctricas de colectores cilindros parabólicos*, en , (2013): 34.

- Mosquera, P., *La energía termosolar cuenta ya con 4.940 MW instalados en el mundo*, en Renewable Energy Magazine, (2016), URL www.energias-renovables.com/termosolar/.
- Naredo, J. M., *El conflicto entre eficacia y sostenibilidad: Utilizar el capital mineral de la Tierra o el flujo solar y sus derivados renovables*, en Polis (Santiago), Bd. 7 (2008), 21: 91–104.
- Nise, N. S. y Romo, J. H., *Sistemas de control para ingeniería*, Compañía Editorial Continental (2002).
- OMS, *Cambio Climático y Salud* (2016), URL www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/.
- Ortega, J. G. y Camacho, E. F., *Mobile robot navigation in a partially structured static environment, using neural predictive control*, en Control Engineering Practice, Bd. 4 (1996), 12: 1669–1679.
- Pachauri, R. y Meyer, L., *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*, en IPCC, Ginebra, Suiza, (2014): 175.
- Paredes Velasco, C., *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*, en , (2012).
- Piña, R. Q., *Replanteo de instalaciones solares térmicas*, Innovación y Cualificación (2011).
- Qin, S. J. y Badgwell, T. A., *An overview of industrial model predictive control technology*, en *AIChE Symposium Series*, Bd. 93, S. 232–256, New York, NY: American Institute of Chemical Engineers, 1971-c2002. (1997).

- Richalet, J., *Industrial applications of model based predictive control*, en *Automatica* (Journal of IFAC), Bd. 29 (1993), 5: 1251–1274.
- Richter, C., y otros., *Energía solar térmica de concentración* (2009).
- Rubio, F. R., y otros., *Self-tuning PI control of a solar power plant*, en *Adaptive Systems in Control and Signal Processing 1989*, S. 277–282, Elsevier (1990).
- Ruiz Hernández, V., *La electricidad solar térmica, tan lejos, tan cerca*, en Fundación Gas Natural, (2009).
- Salgado, J. M. F. y María, J., *Guía completa de la energía solar térmica y termoeléctrica*, Madrid: A. Madrid vicente (2010).
- Sánchez, I. L., *Estado del arte de tubos receptores para captadores cilindro-parabólicos. Comparación de modelos estáticos.*, en Departamento de Ingeniería Energética. Grupo Termotecnia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, (2015): 28.
- Sawin, J. L. y Martinot, E., *Renewables bounced back in 2010, finds REN21 global report*, en *Renewable Energy World*, Bd. 29 (2011).
- Seborg, D. E., *A perspective on advanced strategies for process control (revisited)*, en *Advances in Control*, S. 103–134, Springer (1999).
- Solar Symposium, *El tubo absorbente* (2014), URL www.energyprofessionalsymposium.com.
- Suárez Tamayo, S. y Molina Esquivel, E., *El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente*, en *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, Bd. 52 (2014), 3: 357–363.

- Tamani, B. V., *Efectos del retardo en el control de lazo cerrado de plantas sobreamortiguadas*, en *Industrial Data*, Bd. 15 (2014), 1: 110–119.
- Tasdemiroglu, E., *Solar energy utilization: Technical and economic aspects*, Middle East Technical University (1990).
- Tonda, J., *El oro solar y otras fuentes de energía*, en *La ciencia desde México/119*, (2003).
- Trigo, P. J., *Diseño de estrategias de control predictivo multi-objetivo para un filtro activo en paralelo trifásico de tres hilos*, Tesis Doctoral, Universidad de Chile (2016).
- Tymvios, F. S., y otros., *Comparative study of Ångström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation*, en *Solar energy*, Bd. 78 (2005), 6: 752–762.
- Velasco, C., *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*, en , (2012).
- VILLA, C. B., *Necesidad y viabilidad de un sistema eléctrico 100 % renovable*, Ediciones Universidad de Salamanca (2014).
- Winter, C.-J., y otros., *Solar power plants: fundamentals, technology, systems, economics*, Springer Science & Business Media (2012).
- Zarza, E., y otros., *The DISS project: direct steam generation in parabolic trough systems. Operation and maintenance experience and update on project status*, en *Transactions-American Society of Mechanical Engineers*, Bd. 124 (2002), 2: 126–133.