

CONTROL ROBUSTO QFT DE UN CAMPO DE COLECTORES SOLARES CILINDRO-
PARABÓLICOS BASADO EN UN OBSERVADOR DE PERTURBACIONES

MIGUEL ÁNGEL ARDILA LARRAHONDO
ALBERTO JOSÉ BERMÚDEZ ÁRIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016

CONTROL ROBUSTO QFT DE UN CAMPO DE COLECTORES SOLARES CILINDRO-
PARABÓLICOS BASADO EN UN OBSERVADOR DE PERTURBACIONES

MIGUEL ÁNGEL ARDILA LARRAHONDO
ALBERTO JOSÉ BERMÚDEZ ÁRIAS

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electricista

DIRECTOR
MSc. JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA

CODIRECTOR
PhD. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016

*A mis padres, por su amor, confianza y apoyo incondicional.
A mis hermanas, amigos y a todos lo que han alentado este trabajo.*

Miguel Ardila

*A Dios, por darme la oportunidad de vivir y haberme dado salud,
inteligencia, paciencia, perseverancia, fortaleza para poder
lograr este sueño.*

*A mis padres José Alberto Bermúdez y Blanca Arias, por su infinito
amor puro y verdadero, por sus esfuerzos incansables para darme
siempre lo mejor, por siempre creer en mí y brindarme su apoyo
incondicional.*

*A mis abuelos Orlando Bermúdez y Carmen Vergara, por ser mis
segundos padres, por nunca abandonarme en los momentos más
difíciles, y darme su inmenso amor.*

*A mi hermana Alejandra Bermúdez, por ser mi razón para lograr cada
sueño, y espero darle siempre lo mejor.*

*A toda mi familia que ha estado conmigo, pero en especial a mi
Tía Rosa Virginia Bermúdez que nunca dudo de mí y me brindó su
apoyo incondicional.*

*Por último, a mis amigos y compañeros de la universidad por
brindarme su gran compañía.*

Alberto José Bermúdez Arias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
1. ANTECEDENTES	18
2. EL CAMPO SOLAR ACUREX	19
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	19
2.2. EL PROBLEMA DE CONTROL	22
3. MODELOS DINÁMICOS DEL CAMPO	24
3.1. MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS	25
3.2. MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS	26
3.2.1. Propiedades del fluido térmico	29
3.2.2. Coeficiente de transferencia térmica	29
3.2.3. Coeficiente global de pérdidas térmicas	29
3.3. SIMULADOR DE LA PLANTA ACUREX	30
4. FORMULACIÓN GENERAL DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	34
4.1. ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO QFT	34
4.1.1. Introducción	34
4.1.2. Metodología QFT	35
4.2. OBSERVADOR DE PERTURBACIONES	43
4.2.1. Introducción	43
4.2.2. Observador lineal de perturbaciones (DOB)	44
5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	47
5.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR QFT	48
5.1.1. Modelado de la planta con incertidumbre, generación de plantillas y planta nominal $P0j\omega$	48
5.1.2. Definición de especificaciones	50
5.1.3. Creación de contornos (<i>bounds</i>) $Bj\omega$	53
5.1.4. Síntesis del controlador $Gj\omega$	55
5.1.5. Síntesis del pre-filtro $Fj\omega$	55
5.1.6. Validación del diseño	56
5.2. DISEÑO DEL OBSERVADOR DE PERTURBACIONES (DOB)	58

5.2.1. Selección de la planta nominal Gns	58
5.2.2. Selección del filtro Qs	59
5.3. DISEÑO DEL GOBERNADOR DE REFERENCIA.....	60
5.3.1. Funciones de pertenencia	61
5.3.2. Relaciones difusas	63
5.3.3. Defusificación	64
5.4. IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL.....	64
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
6.1. SIMULACIÓN DÍA TIPO 1	67
6.1.1. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB	68
6.1.2. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB-FRG	70
6.2. SIMULACIÓN DÍA TIPO 2	71
6.2.1. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB	71
6.2.2. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB-FRG	74
6.3. ESTUDIO COMPARATIVO	75
6.3.1. SIMULACIÓN DÍA TIPO 1	76
6.3.2. SIMULACIÓN DÍA TIPO 2	77
6.3.3. CONTRASTE CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL EXPUESTA EN LA LITERATURA	78
7. CONCLUSIONES	80
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Campo de colectores solares distribuidos ACUREX	19
Figura 2. Diagrama esquemático del campo ACUREX	20
Figura 3. Sistema de control de temperatura básico para un campo de colectores solares distribuidos	23
Figura 4. Elementos activos y pasivos del modelo de parámetros distribuidos	27
Figura 5. Simulador del campo ACUREX (Simulink®)	31
Figura 6. Comparación simulador-planta real: a) Flujo de aceite, b) Radiación solar directa, c) Temperaturas de salida real y simulada	33
Figura 7. Esquema general de control de dos grados de libertad (2DOF)	35
Figura 8. Especificaciones para el seguimiento de referencia en el dominio del tiempo	39
Figura 9. Respuesta en el dominio de la frecuencia de <i>TRUs</i> sin agregar el cero y <i>TRLs</i> sin adicionar el polo.....	40
Figura 10. Respuesta en el dominio de la frecuencia de <i>TRUs</i> agregando el cero y <i>TRLs</i> adicionando el polo.....	41
Figura 11. Sistema de control con DOB: a) modelo real, b) modelo nominal	44
Figura 12. Esquema de control con observador de perturbaciones y gobernador de referencia	48
Figura 13. Sistema de control incluyendo el feedforward en serie como planta con incertidumbre paramétrica	49
Figura 14. Representación de las plantillas (templates) de acuerdo a las frecuencias de interés	50

Figura 15. Especificación de estabilidad robusta en diagrama de Nichols	51
Figura 16. Respuesta temporal de <i>TRUs</i> y <i>TRUs</i>	52
Figura 17. Respuesta frecuencial de <i>TRUs</i> y <i>TRLs</i>	52
Figura 18. Diferencia frecuencial de $BU = LmTRU$ y $BL = LmTRL$, $\delta R(j\omega) = BU - BL$	52
Figura 19. Contornos de estabilidad robusta	53
Figura 20. Contornos de seguimiento de referencia	54
Figura 21. Síntesis del controlador (loop shaping) $L0j\omega$	55
Figura 22. Síntesis del pre-filtro $Fj\omega$	56
Figura 23. Comprobación de la especificación de estabilidad robusta	57
Figura 24. Esquema de control con el observador de perturbaciones	58
Figura 25. Función de transferencia $1-Qs$ con diferentes parámetros de λ	59
Figura 26. Función de pertenencia de <i>Icorr</i>	62
Figura 27. Función de pertenencia de <i>Tin</i>	62
Figura 28. Función de pertenencia de <i>Tref</i>	63
Figura 29. Superficie de <i>Tref</i> generada por el FRG ante las entradas de <i>Icorr</i> y <i>Tin</i>	63
Figura 30. Defusificación para $Icorr = 550$ y $Tin = 133$	64
Figura 31. Entorno del esquema de control en Simulink®	65
Figura 32. Datos día tipo 1 (16/09/1991)	68
Figura 33. Flujo de aceite QFT-DOB (16/09/1991)	68
Figura 34. Simulación con el controlador QFT-DOB (16/09/1991) ...	69
Figura 35. Zoom temperatura de salida controlador QFT-DOB (16/09/1991)	69
Figura 36. Flujo de aceite QFT-DOB-FRG (16/09/1991)	70
Figura 37. Simulación esquema de control QFT-DOB-FRG (16/09/1991)	70
Figura 38. Datos día tipo 2 (27/03/1996)	72
Figura 39. Simulación con el controlador QFT-DOB (27/03/1996) ...	72
Figura 40. Zoom temperatura de salida controlador QFT-DOB (27/03/1996)	73
Figura 41. Flujo de aceite QFT-DOB (27/03/1996)	73
Figura 42. Simulación esquema de control QFT-DOB-FRG (27/03/1996)	74
Figura 43. Flujo de aceite con y sin observador de perturbaciones (27/03/1996)	75
Figura 44. Simulación con el controlador PI y QFT (16/09/1991) ..	76
Figura 45. Flujo de aceite con el controlador PI y QFT (16/09/1991)	76
Figura 46. Simulación con el controlador PI y QFT (27/03/1996) ..	77

Figura 47. Flujo de aceite con el controlador PI y QFT (27/03/1996)	77
Figura 48. Temperatura de salida esquema MPC modelo ARX día tipo 1	79
Figura 49. Temperatura de salida controlador QFT día tipo 1	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables y parámetros del modelo concentrado	25
Tabla 2. Variables y parámetros del modelo distribuido	27
Tabla 3. Propiedades características del fluido	29
Tabla 4. Variables de simulación	31
Tabla 5. Especificaciones (sin perder generalidad, $H=1$)	37
Tabla 6. Inecuaciones cuadráticas en g	41
Tabla 7. Resultados obtenidos de los diseños propuestos	60
Tabla 8. Relaciones difusas que describen la correspondencia entre variables de entradas y salida	64

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. LÓGICA DIFUSA.....86

RESUMEN

TÍTULO: CONTROL ROBUSTO QFT DE UN CAMPO DE COLECTORES SOLARES CILINDRO-PARABÓLICOS BASADO EN UN OBSERVADOR DE PERTURBACIONES*

AUTORES: MIGUEL ÁNGEL ARDILA LARRAHONDO**
ALBERTO JOSÉ BERMÚDEZ ÁRIAS**

PALABRAS CLAVE: Control robusto, teoría de realimentación cuantitativa, observador de perturbaciones, plantas solares.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado presenta el diseño y simulación de un esquema de control robusto para el campo de colectores solares cilindro-parabólicos Acurex; el cual está ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España. El objetivo principal es controlar la temperatura de salida del aceite a pesar de las fuertes perturbaciones a las que está sujeto el sistema, mediante la manipulación del flujo de aceite que circula a través del campo.

El comportamiento dinámico del campo solar es modelado por un conjunto de sistemas lineales en forma de un sistema de primer orden con incertidumbre paramétrica más un tiempo de retardo. La teoría de realimentación cuantitativa (QFT) es usada para diseñar una estructura de control de dos grados de libertad (prefiltro y controlador de parámetros fijos) cumpliendo con especificaciones robustas de estabilidad y seguimiento de referencia. Un observador

de perturbaciones es diseñado a partir del modelo de primer orden de la planta para disminuir el esfuerzo de control y satisfacer el problema de saturación del flujo de aceite. Para generar un perfil de temperatura de referencia teniendo en cuenta las condiciones de operación y las restricciones de seguridad, un gobernador de referencia es adaptado al esquema de control robusto.

*Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Fisico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jose Jorge Carreño Zagarra. Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía.

ABSTRACT

TITLE: QFT ROBUST CONTROL OF A PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTORS FIELD BASED IN A DISTURBANCE OBSERVER*

AUTHORS: MIGUEL ÁNGEL ARDILA LARRAHONDO**
ALBERTO JOSÉ BERMÚDEZ ÁRIAS**

KEY WORDS: Robust control, quantitative feedback theory, disturbance observer, solar plants.

DESCRIPTION:

This research work presents the design and simulation of a robust control scheme for the Acurex parabolic trough solar collectors field; which is located at Plataforma Solar de Almería (PSA), Spain. The main goal is controlling the outlet oil temperature despite the strong disturbances that the system is subjected, this is achieved by manipulating the oil flow circulating through the field.

The dynamic behavior of the solar field is modeled by a set of linear systems in the form of a first-order model with parametric uncertainty plus a dead time. The quantitative feedback theory (QFT) is used to design a two-degrees-of-freedom control structure (prefilter and fixed controller) fulfilling robust specifications both stability and tracking reference. A disturbance observer is designed from first-order model of the plant in order to reduce the control effort and to fulfill the oil flow saturation problem.

In order to generate a reference temperature profile, taking into account the operating conditions and security constraints, a reference governor is adapted to the robust control scheme.

*Research work.

**Facultad de Ingenierías Fisico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jose Jorge Carreño Zagarra. Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía.

INTRODUCCIÓN

Desde los tiempos más remotos, el desarrollo de la humanidad ha estado ligado en gran parte por el modo de aprovechamiento y utilización de las diferentes formas de energía según las necesidades y disponibilidades de cada momento y lugar.

El uso de energías renovables, como la energía solar, comenzó a presentar un gran impulso a mediados de los años setenta, justo después de la primera gran crisis del petróleo ocasionada por el aumento de precio y el corte de suministro al occidente por parte de los países productores. En ese entonces, los aspectos económicos tomaban un factor de más importancia y, cuando los precios del petróleo cayeron, el interés en las energías renovables también disminuyó [10]. Hoy en día, la fuerte dependencia de energías no renovables y la necesidad de reducir el alto impacto ambiental que genera la producción energética mediante combustibles fósiles, ha impulsado de manera creciente el interés en el uso de energías renovables como una implicación para el futuro.

La fuente de energía sostenible más abundante es el Sol, el cual provee a la Tierra un valor cercano a los 150.000 terawatts; donde cerca de la mitad de la energía alcanza de manera efectiva la superficie de la Tierra, mientras que la otra mitad, es reflejada al espacio exterior por la atmósfera [7]. Tan grande es la magnitud, que con tan solo una pequeña fracción de la energía solar que llega a la superficie, sería suficiente para satisfacer la demanda energética global. Uno de los más grandes desafíos científicos y tecnológicos que afronta la sociedad moderna es desarrollar formas eficientes para recoger, convertir, almacenar y utilizar la energía solar a un costo asequible.

La generación de energía eléctrica a partir de energía solar se puede obtener de manera directa, usando celdas fotovoltaicas o, de manera indirecta, recolectando y concentrando la energía solar para producir vapor, el cual es llevado a una turbina para así obtener electricidad; estas últimas son llamadas Centrales Eléctricas Termosolares (CET). El diseño de este tipo de centrales no comienza hasta 1977 [47], poniéndose en marcha las primeras en 1981.

La principal diferencia entre una planta de generación de energía eléctrica convencional y una planta solar es que, en esta última, la fuente primaria de energía es una variable que no puede ser controlada por el hombre debido a que tiene una gran incertidumbre asociada. El objetivo principal de un sistema de control en un campo de colectores solares cilindro-parabólicos distribuidos, es mantener la temperatura de salida del aceite a un valor deseado, teniendo en cuenta perturbaciones tales como: los cambios en el nivel de radiación solar (causado por las nubes), la reflectividad de los espejos, o la temperatura de entrada del aceite. Por todo ello, en una planta solar se requiere un sofisticado sistema de control capaz de mantener unas especificaciones más rigurosas que en el caso de un control clásico.

Fundamentalmente existen dos tipos de CET, según el número de componentes que transforman la energía solar en térmica; si es solo uno, se denominan sistemas de receptor central y, si cada captador dispone de su propio dispositivo de transformación, se denominan sistemas de colectores distribuidos [47]. Este proyecto de investigación se centra en las CET de colectores distribuidos y, particularmente en el sistema de control necesario para conseguir un mejor aprovechamiento de la energía disponible.

En este trabajo se presenta el método de control robusto cuantitativo QFT (*Quantitative Feedback Theory*), que propone explícitamente el uso de la realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas. Según [32], esta es necesaria únicamente cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o cuando hay perturbaciones no medidas actuando sobre la misma.

En la comunidad de control, es bien sabido que el control en adelanto proporciona un método de compensación de perturbaciones eficaz que puede lograr la atenuación de éstas en el sistema. Sin embargo, requiere que la perturbación sea medida por los sensores. Desafortunadamente, en muchos casos, las perturbaciones son difíciles o incluso imposibles de medir físicamente por éstos

[37]. Es aquí donde los observadores de perturbaciones toman suma importancia, puesto que proporcionan una técnica de estimación de perturbaciones efectiva para una amplia gama de sistemas. El control basado en observadores ha sido considerado como una de las más prometedoras técnicas para atenuar perturbaciones y por consiguiente pretende fue utilizada en este trabajo de investigación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un controlador robusto QFT para un campo de colectores solares cilindro-parabólicos usando un observador de perturbaciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Representar la dinámica del campo de colectores por medio de un modelo lineal con incertidumbre en los parámetros.
- Diseñar un controlador robusto QFT que considere la incertidumbre en los parámetros del modelo y las perturbaciones externas.
- Diseñar un observador de perturbaciones que mejore el desempeño del campo de colectores solares por medio del rechazo activo de perturbaciones.
- Adaptar un gobernador de referencia al esquema de control robusto con el fin de establecer un perfil de temperatura de referencia óptimo para el campo solar.

1. ANTECEDENTES

El control de campos de colectores solares distribuidos (CCSD) ha sido objeto de numerosas investigaciones a nivel mundial. Una revisión detallada se puede ver en [8, 9]. Los métodos descritos en la literatura y que han sido aplicados a campos de colectores solares distribuidos incluyen una gran variedad de esquemas de control, desde los enfoques de control básicos hasta los más avanzados.

Dentro de la vasta cantidad de estrategias de control aplicadas a CCSD, sobresalen: el uso de controladores PID [3, 13, 16, 47, 50], donde prácticamente todos los esquemas incorporan un controlador *feedforward* en el lazo de control; control en cascada (CC): pocas aplicaciones de control en cascada se encuentran en la literatura, algunas se pueden ver en [44, 48, 51]; control adaptivo (AC); control por ganancia programada (GS); control por modelo interno (IMC); compensación de tiempo muerto (TDC); control óptimo (LQG); control no lineal (NC); control robusto (RC); control predictivo basado en modelo (MPC): implementaciones de controladores MPC con parámetros fijos [11, 13], aplicaciones de control MPC adaptivo [11, 39], control MPC por ganancia programada [4, 35], control MPC robusto [12, 22]; control basado en lógica difusa (FLC) [15, 46]; control mediante redes neuronales (NNC); control jerárquico (HC).

En lo que respecta a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, no se tienen antecedentes en relación al control de CCSD, por lo que este trabajo abre las puertas a nuevas investigaciones en este campo.

2. EL CAMPO SOLAR ACUREX

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

La planta en particular sobre la que se realiza este trabajo de investigación es el campo solar ACUREX, ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España. Este, es un campo de colectores cilindro-parabólicos (PTC, por sus siglas en inglés: *Parabolic Trough Collectors*), con seguimiento solar en elevación tipo ACUREX, modelo 3001. El campo es un prototipo que ha sido usado como banco de pruebas para el desarrollo de nuevas generaciones de plantas solares con PTC. Su potencia nominal máxima es pequeña, solo 0.5 MW [36]; debido a que fue desarrollado con fines experimentales.

Figura 1. Campo de colectores solares distribuidos ACUREX



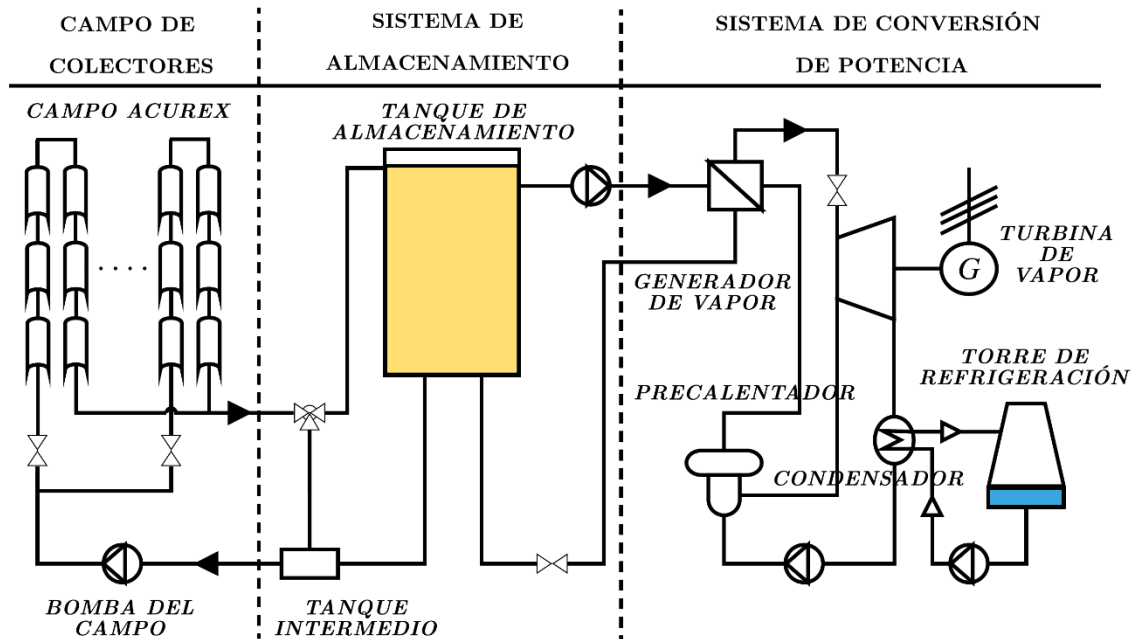
Fuente: YEBRA, Luis Jose, et al. Object-oriented modelling and simulation of ACUREX solar thermal power plant. *En:* Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2010. vol. 16, no. 3, p. 211-224.

El campo ACUREX está compuesto por un total de 480 módulos orientados de Este a Oeste, arreglados en 20 filas de colectores, formando 10 lazos paralelos, cada uno de ellos con una longitud de 172 m. El campo tiene una superficie total de apertura de los espejos de 2674 m². La Figura 1 muestra una vista aérea del campo.

Cada colector refleja y concentra la radiación solar directa sobre un tubo receptor que se encuentra en su línea focal por donde circula un fluido térmico que se va calentando a medida que pasa por el campo. El fluido térmico usado en este campo es el aceite térmico Therminol® 55, capaz de soportar temperaturas de hasta 300°C sin degradarse [24]. El aceite es bombeado desde el fondo de un tanque de almacenamiento hacia el campo solar donde recoge el calor transferido a través de las paredes del tubo receptor (lazo 1 a lazo 10). Tan pronto se ha aumentado su temperatura, es enviado a la parte superior del tanque de almacenamiento donde se mantiene caliente debido al principio de estratificación térmica¹ (el aceite frío se encuentra en la parte baja y el caliente en la parte superior) [3, 19].

Figura 2. Diagrama esquemático del campo ACUREX

¹ Los tanques de estratificación térmica (termoclina) permiten el almacenamiento de energía a diferentes temperaturas aprovechando las características térmicas del fluido que contienen [1].



Fuente: RUBIO, Francisco; CAMACHO, Eduardo y BERENGUEL, Manuel. Control de campos de colectores solares. En: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Octubre, 2006. vol. 3, no. 4, p. 26-45. Modificado por los autores.

El tanque de almacenamiento está conectado a dos sistemas para utilizar la energía almacenada en él. Uno es el generador de vapor, donde el aceite caliente tomado de la parte superior del tanque es utilizado para producir vapor, el cual es enviado posteriormente a una turbina acoplada a un generador eléctrico. El otro sistema es una planta desalinizadora donde se produce agua potable a partir de agua salada. La Figura 2 muestra un diagrama simplificado del campo.

A la salida del campo solar está situada una válvula de tres vías, la cual permite recircular el fluido por el campo hasta que tenga una temperatura adecuada para ser introducido en la parte superior del tanque de almacenamiento y poner en marcha el sistema.

El depósito usado en este campo de colectores tiene una capacidad de 140 m^3 y permite el almacenamiento de $2,3 \text{ MWh}_t$ para una temperatura de entrada al campo de $210 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura de salida de $290 \text{ }^\circ\text{C}$ [10].

El campo está equipado con un sistema de seguimiento del Sol que mueve los espejos alrededor de un eje paralelo al de la tubería. Su funcionamiento se explica detalladamente por Carmona en [17]. El mecanismo de seguimiento puede alcanzar tres posibles estados [3]:

- **Seguimiento** (*track*): El mecanismo sigue al Sol y los colectores enfocan sobre la tubería.
- **Desenfocado** (*desteer*): El mecanismo sigue al Sol, pero desenfoca el colector varios grados, situando fuera de la zona focal el tubo receptor y el fluido no se calienta.
- **Boca-abajo** (*stow*): El mecanismo lleva al colector a una posición invertida, no existiendo ningún tipo de seguimiento del Sol. A esta fase se llega al final del día o si una alarma grave se produce.

El sistema toma unos 5 minutos en llevar el campo de la posición boca-abajo a seguimiento y, solo unos 20 segundos en pasar de desenfocado a seguimiento.

2.2. EL PROBLEMA DE CONTROL

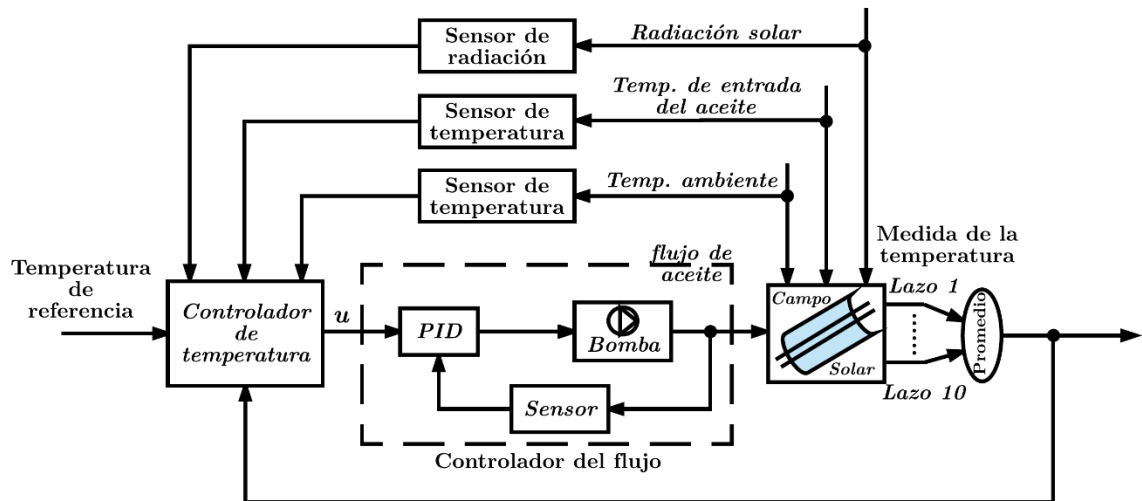
El objetivo de control en un campo de colectores solares distribuidos, es el de mantener la temperatura de salida del aceite del campo a un valor deseado (T_{ref}), mediante la manipulación del flujo de aceite proporcionado por una bomba que lo hace circular a través del campo.

Este valor debe ser el más alto posible teniendo en cuenta las propiedades del aceite térmico y las condiciones de operación. Hablando estrictamente del campo ACUREX, para propósitos de generación de energía eléctrica, la temperatura debe rondar los 285°C; y, para su uso en la planta desalinizadora, debe estar por encima de los 160°C [21]. Asimismo, existen algunas restricciones impuestas para la seguridad de funcionamiento de la planta. La bomba que hace circular el aceite, fue diseñada para proporcionar un flujo en el rango de 2 a 12 l/s [19], imponiendo de esta manera el rango de operación de la planta. Además, la diferencia de temperaturas salida-entrada del aceite, no debe superar los 80°C ($\Delta T \leq 80^\circ\text{C}$); esto con el fin de evitar tensiones del material de los tubos absorbedores [20].

Desde el punto de vista de control, este tipo de plantas presenta características como comportamientos no lineales, complejidades, requerimientos de simplificación en los modelos, variaciones en la dinámica y, cambios en las condiciones ambientales [10]. Las principales perturbaciones que afectan al sistema son [36]:

- Variaciones en la radiación solar debido al paso de nubes y humedad presente en la atmósfera;
- Cambios en la temperatura ambiente;
- Cambios en la temperatura de entrada del fluido;
- Perturbaciones debido a factores como concentración de polvo en la superficie de los espejos y fuertes corrientes de viento que puedan afectar la forma de los espejos.

Figura 3. Sistema de control de temperatura básico para un campo de colectores solares distribuidos



Fuente: LEMOS, João M.; NEVES-SILVA, Rui; IGREJA, José M. *Adaptive control of solar energy collector systems*. Springer, 2014. Traducido por los autores.

Puesto a que el flujo del aceite cambia sustancialmente durante la operación de la planta, se generan variaciones en las características dinámicas del campo tales como tiempo de respuesta y tiempo de retardo [41]. Este retardo, aparece debido al tiempo que tarda el fluido en atravesar el campo, estando relacionado directamente con el caudal de flujo (variable controlada). Este tipo de retardo está presente tanto en el campo como en las tuberías que conectan los lazos con el tanque de almacenamiento.

Como se menciona en [41], los tiempos muertos (*dead-times*) dificultan el control de este tipo de sistemas, debido a que introducen un retardo adicional en la fase de los mismos, reduciendo el margen de fase y de ganancia de la función de transferencia.

Al hacer simplificaciones en el modelado del sistema, surgen fuertes dinámicas no modeladas y, las dinámicas linealizadas, varían de acuerdo al punto de funcionamiento; de hecho, y como se verá a continuación, la planta es mejor modelada como un sistema de parámetros distribuidos. Además, hay modos de resonancia en la respuesta de frecuencia del campo de colectores solares dentro del ancho de banda de control, tal que cuando se estimula el sistema con una señal de flujo de aceite o de irradiancia solar que contiene componentes de frecuencia fundamental correspondientes a las de los modos de resonancia, se pueden presentar oscilaciones a la salida del sistema [10].

Según varios autores, la fase en la que se hace más complicado operar el sistema (desde el punto de vista del control) es la fase de arranque.

3. MODELOS DINÁMICOS DEL CAMPO

Contar con un modelo dinámico de la planta que permita simular gran variedad de comportamientos, es de gran interés para propósitos de control. Esto, con el objetivo de poder valorar el desempeño de distintos controladores posibles de una forma rápida y sencilla.

A continuación, se exhiben dos modelos matemáticos que representan la dinámica del campo de colectores; uno de manera más simple (parámetros concentrados), y otro de forma más compleja (parámetros distribuidos) donde se tiene en cuenta gran parte de la dinámica no lineal de la planta. El modelo de parámetros distribuidos fue desarrollado por Carmona en [17], y posteriormente, un modelo simplificado fue desarrollado por

Berenguel en [3]. Desde entonces, ambos modelos han sido utilizados ampliamente en la literatura.

Como se menciona en [47], estos modelos han sido de gran utilidad a la hora de realizar análisis de las características dinámicas de la planta, de simulación y de control del campo.

Para la aplicación de algunas técnicas de control en este proyecto, se hará uso del modelo de parámetros concentrados y, para las simulaciones y validación del esquema de control propuesto, se utilizará el modelo de parámetros distribuidos.

3.1. MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS

Este es un modelo simplificado en el que se supone una descripción concentrada de la planta y se asume que las temperaturas del fluido y del metal del tubo son iguales. Por lo que solo se tiene en cuenta la temperatura de entrada y de salida del aceite:

$$C \frac{dT}{dt} = \eta_{col} RI - \dot{q} P c_p (T - T_{in}) - H_l (T_m - T_a) \quad (3.1)$$

En la siguiente tabla se muestra la descripción de las variables y parámetros que aparecen en la Ecuación 3.1.

Tabla 1. Variables y parámetros del modelo concentrado

Parámetro	Descripción	Unidades
C	Capacidad térmica específica	$\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$
T	Temperatura de salida del aceite	°C
T_a	Temperatura ambiente	°C
T_m	Temperatura media del aceite (entrada-salida)	°C
q	Flujo volumétrico de aceite	l s^{-1}
I	Radiación solar efectiva	W m^{-2}
η_{col}	Eficiencia óptica de los espejos	
G	Apertura óptica de los espejos	m
H_l	Coefficiente global de pérdidas	$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$
R	Superficie efectiva del colector	m

Mediante un método de regresión múltiple hecho a un grupo de 60 observaciones tomadas en diferentes condiciones de operación en

estado estacionario de la planta real; en [17], se define un coeficiente global de pérdidas térmicas H_l de 1.05 kW/°C.

Los demás parámetros se identificaron también de manera experimental. Donde se estima el parámetro $C=2267$ kW/°C y $\eta_{col}R=1322$ m². El proceso de identificación detallado puede verse en [45].

Si bien el modelo de parámetros concentrados no describe la planta con tanto detalle, puede ser una buena aproximación para el ensayo de controladores cuando la dinámica de la planta es lenta.

3.2. MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

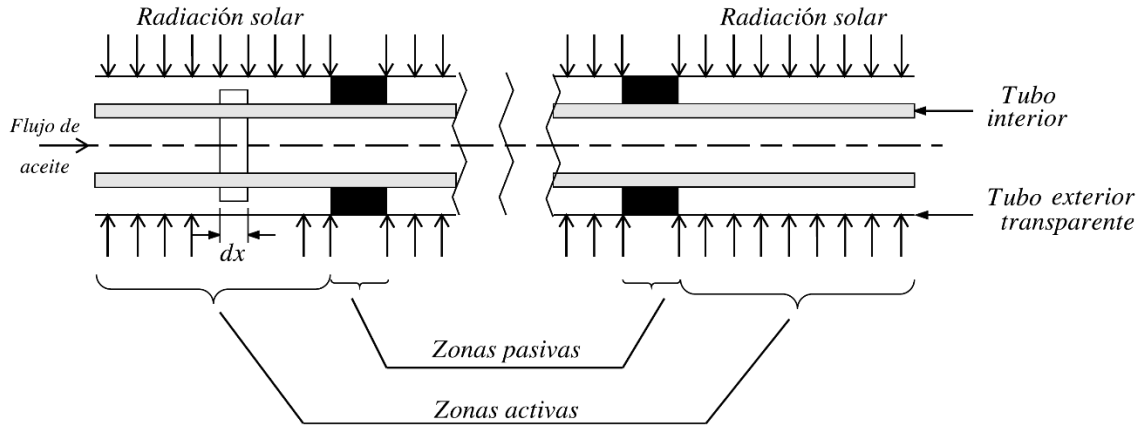
El comportamiento dinámico del campo de colectores solares distribuidos ACUREX, es simulado por 100 submodelos de parámetros concentrados [13], en donde las temperaturas del aceite y las paredes del tubo se modelan de manera independiente. Este modelo tiene en cuenta también la geometría del campo, reflectividad de los espejos, posición del Sol, radiación solar y, la temperatura de entrada del aceite al campo [5, 14].

Para el desarrollo del modelo que permite conocer la temperatura del tubo y del aceite a lo largo del colector en cualquier instante de tiempo, se han hecho las siguientes suposiciones [17]:

- Las propiedades del aceite son consideradas función de la temperatura, las cuales varía con el tiempo y el espacio.
- El flujo de calor que incide en cada sección se considera radialmente uniforme y equivalente al flujo medio.
- Se considera despreciable la variación radial de la temperatura de las paredes del tubo. Esta suposición es prudente para una pared fina hecha de un material con buena conductividad térmica.
- El flujo de aceite y la irradiancia son considerados funciones del tiempo y en cada instante son los mismos para cada elemento irradiado (suponiendo fluido incomprensible).
- La conducción axial de calor en las paredes del tubo y en el fluido se consideran despreciables; esto debido al poco espesor de la pared y a la baja conductividad térmica del aceite.
- La capacidad térmica específica a presión y volumen constante se considera equivalente.

Cada lazo del campo ACUREX está compuesto por cuatro colectores de doce módulos conectados en serie. La longitud de un lazo es de 172 m, como ya se había mencionado anteriormente; de donde 142 m se pueden clasificar como parte activa y, 30 m como parte pasiva. Las zonas activas son aquellas que reciben directamente la radiación solar concentrada por los colectores mientras que las pasivas son las no irradiadas (uniones de módulos, etc).

Figura 4. Elementos activos y pasivos del modelo de parámetros distribuidos



Fuente: ANDRADE, G. A., et al. A practical NMPC with robustness of stability applied to distributed solar power plants. *Solar Energy*, 2013, vol. 92, p. 106-122. Modificado por los autores.

Bajo algunas hipótesis, el comportamiento del campo se puede describir mediante un modelo de parámetros distribuidos de la temperatura [5, 13, 17, 42] usando el siguiente sistema de ecuaciones parciales:

$$\rho_m c_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t}(t, x) = \eta_{col} G I(t) - \pi D_m H_l (T_m(t, x) - T_a(t)) - \pi D_f H_t (T_m(t, x) - T_f(t, x)) \quad (3.2)$$

$$\rho_f c_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t, x) + \rho_f c_f q(t) \frac{\partial T_f}{\partial x}(t, x) = \pi D_f H_t (T_m(t, x) - T_f(t, x)) \quad (3.3)$$

donde el subíndice m se refiere al metal y el f al fluido.

Tabla 2. Variables y parámetros del modelo distribuido

Parámetro	Descripción	Unidades
t	Tiempo	s
x	Espacio	m
ρ	Densidad	kg m ⁻³
c	Capacidad térmica específica	kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹
A	Área transversal	m ²

$T(t, l)$	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$T_a(t)$	Temperatura ambiente	$^{\circ}\text{C}$
$q(t)$	Flujo volumétrico impulsado por la bomba	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$I(t)$	Radiación solar efectiva	W m^{-2}
η_{col}	Eficiencia óptica de los espejos	
G	Apertura óptica de los espejos	m
H_t	Coefficiente global de pérdidas térmicas	$\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
H_l	Coefficiente de transmisión metal-fluido	$\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
D	Diámetro del tubo	m

Estas ecuaciones solo son aplicables a las zonas activas. Las ecuaciones que describen las zonas pasivas son similares, pero tienen entrada de radiación nula y el coeficiente de pérdidas térmicas es mucho menor debido al aislamiento térmico [10].

Las ecuaciones que describen el comportamiento del campo completo (serie de elementos activos y pasivos), se resuelven mediante una aproximación iterativa por diferencias finitas [3, 17]. Donde se calcula la temperatura para el fluido y las paredes del metal cada intervalo de tiempo (dt) y elemento (dx). Cada segmento se considera con una longitud de un metro y el paso de integración es de 0.5 segundos.

El proceso iterativo se desarrolla mediante dos etapas. En la primera etapa (Ecuaciones 3.4 y 3.5), se calcula la temperatura del fluido y del metal, suponiendo un régimen estacionario. En la segunda (Ecuación 3.6), se corrige la temperatura calculada en función de la energía neta transportada por el fluido.

▪ Primera etapa:

$$T_m(k, n) = T_m(k-1, n) + \frac{\Delta t}{\rho_m c_m A_m} (n_{col} G I(k) - \pi D_m H_l (T_m(k-1, n) - T_a(k)) - \pi D_f H_t (T_m(k-1, n) - T_{1f}(k-1, n))) \quad (3.4)$$

$$T_{1f}(k, n) = T_{1f}(k-1, n) + \frac{\pi D_f H_t \Delta t}{\rho_f c_f A_f} (T_m(k-1, n) - T_{1f}(k-1, n)) \quad (3.5)$$

▪ Segunda etapa:

$$T_{1f}(k, n) = T_f(k, n) - \frac{q(k) \Delta t}{A_f \Delta l} (T_f(k, n) - T_f(k, n-1)) \quad (3.6)$$

donde en las ecuaciones, $T_f(k, n)$ y $T_m(k, n)$ son las temperaturas del fluido y del metal en el segmento n durante el intervalo k .

3.2.1. Propiedades del fluido térmico

La densidad del aceite Therminol® 55 es altamente dependiente de la temperatura, lo que permite la utilización de un único tanque para su almacenamiento conteniendo tanto el aceite frío como el caliente por estratificación térmica [1].

Las propiedades físicas del aceite se pueden representar como polinomios en función de la temperatura [10]:

Tabla 3. Propiedades características del fluido

Ecuación	Descripción	Unidades
$\rho_f = 903 - 0.672T_f$	Densidad	kg m^{-3}
$c_f = 1820 + 3.478T_f$	Capacidad térmica específica	$\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$k_f = 0.1923 - 1.3 \cdot 10^{-4}T_f$	Conductividad térmica	$\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$\mu_f = 1.41 \cdot 10^{-2} - 1.6 \cdot 10^{-4}T_f + 6.41 \cdot 10^{-7}T_f^2 - 8.66 \cdot 10^{-10}T_f^3$	Viscosidad dinámica	Pa s
$P_{ra} = 212 - 2.2786T_f + 8.97 \cdot 10^{-3}T_f^2 - 1.2 \cdot 10^{-5}T_f^3$	Número de Prandtl	

3.2.2. Coeficiente de transferencia térmica

El coeficiente de transferencia térmica entre el fluido y el tubo receptor se puede expresar en función del caudal (q) y de un coeficiente dependiente de la temperatura (H_v):

$$H_t = H_v q^{0.8} \quad (3.7)$$

$$H_v(T_f) = 2.17 \cdot 10^6 - 5.01 \cdot 10^4 T_f + 4.53 \cdot 10^2 T_f^2 - 1.64 T_f^3 + 2.1 \cdot 10^{-3} T_f^4 \quad (3.8)$$

3.2.3. Coeficiente global de pérdidas térmicas

Este coeficiente se ha calculado mediante diversas pruebas realizadas en el campo [17]; haciendo circular aceite a través de los colectores en posición invertida (boca-abajo) mientras se mantiene la temperatura de entrada y el flujo constantes, hasta que se alcanza el estado estacionario.

$$H_l = 0.00249 \overline{\Delta T} - 0.06133 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})] \quad (3.9)$$

donde $\overline{\Delta T}$ es la diferencia entre la media de la temperatura de entrada y de salida y, la temperatura ambiente:

$$\overline{\Delta T} = \overline{T}_f - T_a = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_a \quad (3.10)$$

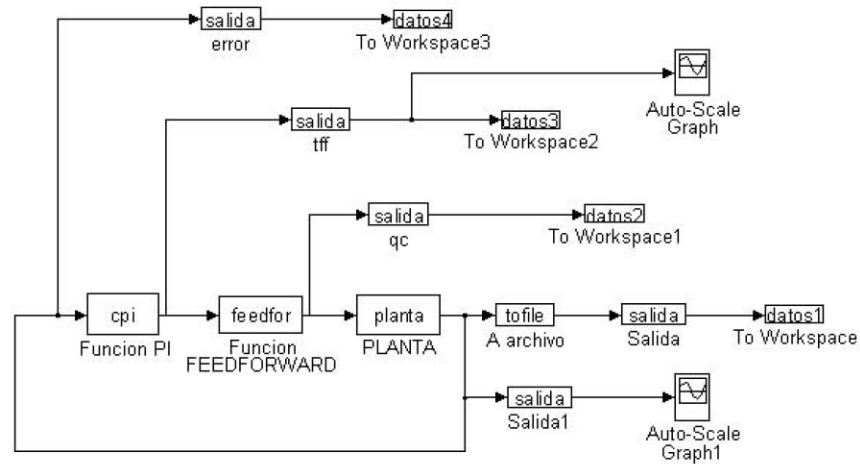
3.3. SIMULADOR DE LA PLANTA ACUREX

Los programas de simulación pueden ser herramientas de gran utilidad para el diseño y análisis de sistemas físicos. Los efectos de variación de parámetros sobre el comportamiento de un sistema dado, se pueden determinar de una manera relativamente fácil. A lo largo de la historia, se han desarrollado cuantiosos modelos de simulación para diseñar, analizar y describir el comportamiento de plantas termosolares.

Carmona en su tesis doctoral [17], realizó el primer simulador del modelo dinámico del campo ACUREX, mediante la representación en parámetros distribuidos de un lazo de colectores siguiendo el algoritmo iterativo de diferencias finitas presentado anteriormente para la simulación; donde se calcula la temperatura de salida del fluido en dos etapas. El modelo se denominó ALDIMO, y fue desarrollado e implementado en el computador PDP-11-34 del Departamento de Automática de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla, España. En [17] se expone la estructura del programa y se muestran algunas pruebas realizadas bajo diferentes condiciones de operación donde se comparan los datos arrojados por el simulador y los datos experimentales obtenidos del campo.

Camacho, Rubio y Gutiérrez en [14], desarrollaron un software para la simulación del campo ACUREX utilizando lenguaje C. Allí se presenta la validación del modelo de parámetros distribuidos propuesto, comparando los resultados obtenidos mediante simulación y los datos reales. En dichas pruebas se compara el comportamiento del modelo ante condiciones como: escalones en el caudal de entrada (flujo alto y bajo), cambio de seguimiento a desenfocado, de desenfocado a seguimiento, etc.

Figura 5. Simulador del campo ACUREX (Simulink®)



Posteriormente, el software fue cambiado del lenguaje C al entorno de Simulink® (versión 1.3b). Este simulador (Figura 5), descrito en [5], está compuesto por tres bloques principales: controlador PI, *feedforward* y planta. Para la simulación del sistema, se emplean 39 variables que se actualizan a medida que transcurre el proceso y, se tienen en cuenta datos reales de radiación, temperatura ambiente y temperatura de entrada del aceite medidos el 16 de septiembre de 1991 en la PSA. En la Tabla 4 se presentan las variables de simulación.

Tabla 4. Variables de simulación

tinic	Tiempo inicial de simulación en segundos.
dt	Intervalo de integración usado en simulación.
timer	Tiempo actual de simulación en segundos.
c[15]	Vector con propósitos generales introducido para tener en cuenta diversas circunstancias de simulación. c[0] contiene la diferencia (en segundos) entre la hora local y solar, c[2] contiene el número de lazos activos (a través de los cuales circula el fluido en condiciones de operación) y c[3] es el número de lazos cerrados (no operables debido a fallas). Estas variables son usadas en el cálculo de funciones de pérdidas el controlador prealimentado (<i>feedforward</i>).
tesc	Tiempo de muestreo global usado en la simulación. El valor de esta variable es de 39 segundos (el mismo que es usado en la planta para propósitos de control). El tiempo de muestreo usado para la adquisición de datos ambientales es de 3 segundos. De esta manera, este valor puede ser modificado si un algoritmo de control con menor tiempo de muestreo es implementado.
qc	Flujo de aceite que el <i>feedforward</i> (u otro controlador,

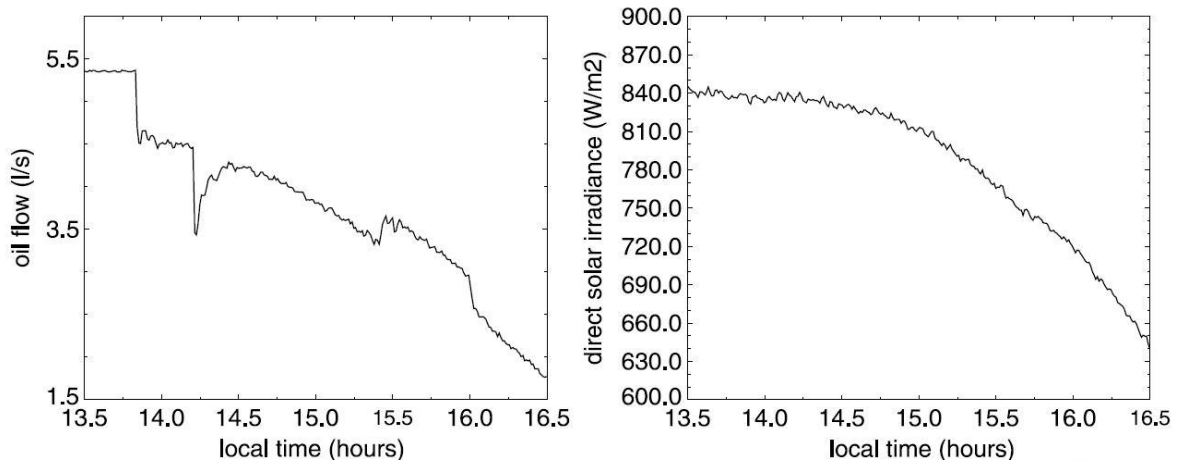
	si un algoritmo de control que no use el controlador <i>feedforward</i> es implementado) demanda a la bomba. Este es el valor de <i>set-point</i> para la bomba.
q4	Flujo de salida obtenido de la bomba. La bomba es simulada como un sistema de segundo orden con el fin de proporcionar las pérdidas de carga como las que se producen en la bomba real. Algunas pruebas fueron realizadas para comparar los valores de simulación con los reales y los resultados fueron muy exitosos.
nit	Número de iteraciones realizadas en cada tiempo de muestreo.
r7	Densidad del aceite (función de la temperatura).
p12	Coefficiente global de pérdidas térmicas (función de la temperatura).
refx	Reflectividad de los espejos. Este parámetro es modificado de acuerdo al real obtenido en la planta el día de la prueba.
logo	Variable lógica.
tin	Temperatura real de entrada del aceite. Esta variable es fundamental para propósitos de simulación. Leyendo esta variable del archivo de datos se puede tomar en cuenta transitorios en la temperatura de entrada del aceite (ocurre usualmente en el inicio de la operación). Un archivo definido por el usuario puede ser utilizado con el fin de simular diferentes condiciones de entrada de aceite.
tout	Temperatura real de salida del aceite obtenida del campo.
tamb	Temperatura ambiente real (variable medida).
tref	Temperatura de referencia.
irr	Radiación solar real medida en la planta.
ue	Flujo real de aceite demandado a la bomba en pruebas.
u	Flujo real de aceite obtenido desde la bomba.
ff	Flujo real de aceite requerido por el <i>feedforward</i> .
tiempo	Hora local hh:mm:ss.
trff	Temperatura de referencia para el <i>feedforward</i> .
fupif	Variable de control auxiliar.
fupia	Variable de control auxiliar.
fcero	Variable de control auxiliar.
tasa[40]	Vector de constantes del campo (ver archivo <i>tasas.txt</i>).
vniv[500]	Vector de secciones de aceite y metal. Elementos entre 19 y 250 corresponden al aceite y los siguientes 250 al metal (inicializar archivo <i>vniv.txt</i>). El elemento <i>vniv[102]</i> es la temperatura de salida de la planta.
bdiaju	Día Juliano usado para calcular la radiación solar corregida (la fracción de la radiación global medida que incide directamente en el tubo).
feed	Flujo demandado por el <i>feedforward</i> (igual a <i>qc</i>).
irrcor	Radiación solar corregida.

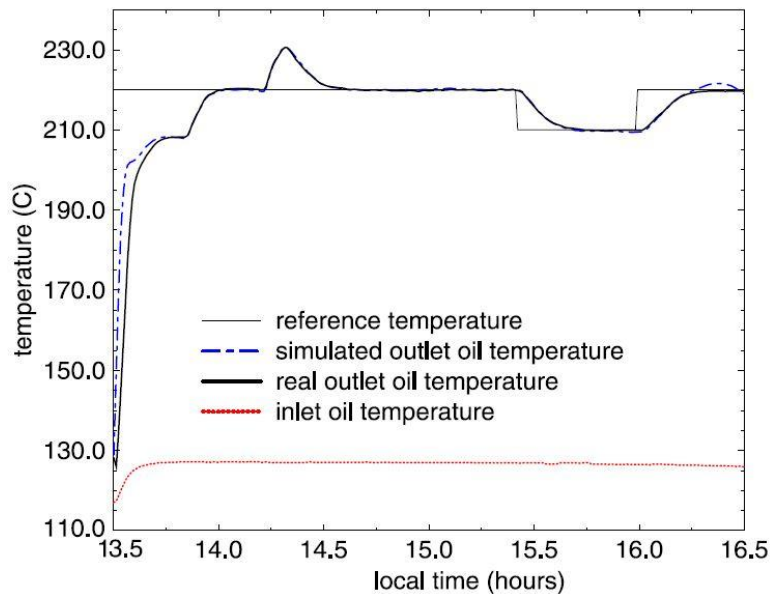
treg	Temperatura de referencia demandada.
tff	Valor de la variable de control si el <i>feedforward</i> está siendo usado (temperatura de referencia para el <i>feedforward</i>).

Fuente: BERENGUEL, Manuel; CAMACHO, Eduardo F.; RUBIO, Francisco R. Simulation software package for the Acurex field. *ESI of Seville, Spain, Internal Rep, 1993.*

Como puede verse en la Figura 6, el comportamiento del modelo de parámetros distribuidos es muy similar al de la planta real. Esto asegura que la estrategia de control que se implemente en el simulador y presente resultados satisfactorios, también lo hará en la planta real. Las discrepancias presentadas en la fase de arranque, son debidas a que; como cita Berenguel en [3], básicamente es imposible conocer el perfil inicial de temperatura en el interior del tubo y, a la degradación de las propiedades térmicas del aceite a temperaturas bajas. Al final del día también se nota una pequeña discrepancia, esta debida a la disminución gradual de la radiación solar y a que los coeficientes del modelo no son del todo exactos.

Figura 6. Comparación simulador-planta real: a) Flujo de aceite, b) Radiación solar directa, c) Temperaturas de salida real y simulada





Fuente: CAMACHO, Eduardo F., et. al. Control of Solar Energy Systems. Springer-Verlag London, 2012.

4. FORMULACIÓN GENERAL DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

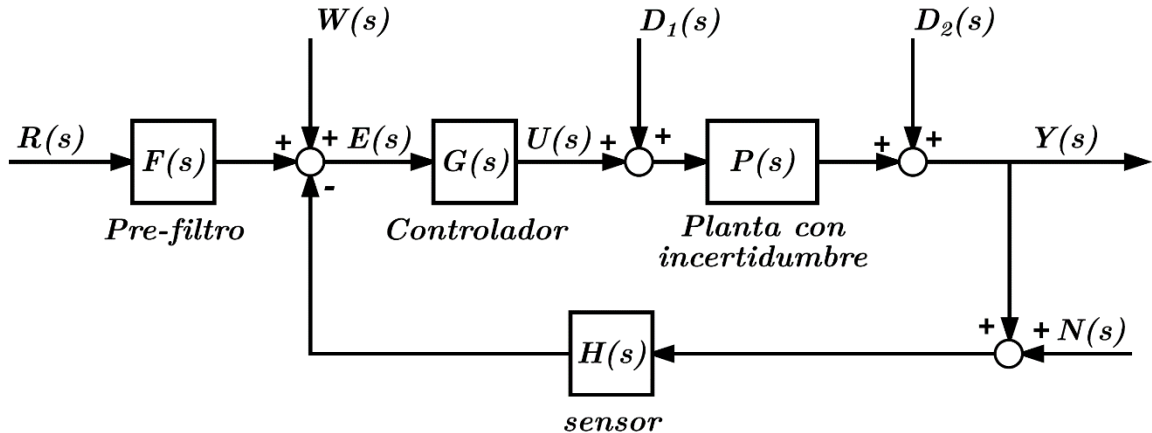
4.1. ESTRATEGIA DE CONTROL ROBUSTO QFT

4.1.1. Introducción

La teoría de realimentación cuantitativa, más conocida por sus siglas QFT (*Quantitative Feedback Theory*), fue desarrollada por Isaac M. Horowitz (1959); presentando excelentes resultados en sistemas de control realimentado. Según [27], QFT es una estrategia de control que propone explícitamente el uso de la realimentación para reducir los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas. La estrategia de control QFT se basa en el diseño de controladores en el dominio de la frecuencia propuesto por Bode y

afirma que la realimentación solo es necesaria cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o, cuando hay perturbaciones no modeladas actuando sobre la misma (Figura 7).

Figura 7. Esquema general de control de dos grados de libertad (2DOF)



El principal objetivo de la estrategia QFT, es la sintonización (*loop-shaping*) de un controlador lo más simple posible, con un ancho de banda mínimo, que cumpla el conjunto de especificaciones deseadas para cualquier planta dentro de la incertidumbre. El método de diseño es muy transparente, permitiendo distinguir cuantitativamente diferentes compromisos de complejidad y robustez para cumplir las especificaciones deseadas a cada frecuencia [27]. La estrategia de control QFT es válida para:

- Sistemas estables y sistemas inestables;
- Procesos SISO (monovariantes) y MIMO (multivariantes);
- Sistemas continuos y discretos;
- Proceso de parámetros constantes y parámetros variables;
- Sistemas de fase mínima y fase no mínima;
- Sistemas de control en cascada.

4.1.2. Metodología QFT

Un sistema de control realimentado de dos grados de libertad ($2-DOF$), como el mostrado en la Figura 7, es necesario en sistemas con incertidumbre para garantizar el seguimiento a la referencia $R(s)$ y un adecuado rechazo de perturbaciones $D_1(s)$, $D_2(s)$. El diseño con QFT se efectúa en dos etapas; la primera, es la sintonización del controlador $G(s)$, que minimiza la variación de la planta en lazo cerrado debido a la incertidumbre en el modelo y a la entrada de perturbaciones. Reducida dicha sensibilidad en lazo cerrado, el pre-filtro $F(s)$ se diseña en una segunda etapa para

aseverar un seguimiento de referencia estricto para cada frecuencia [38].

En esta sección se describe la metodología de diseño QFT. Los pasos que componen esta estrategia de control son:

- Modelado de la planta con incertidumbre, generación de plantillas y planta nominal $P_0(j\omega)$;
- Definición de especificaciones;
- Creación de contornos $B(j\omega)$;
- Síntesis del controlador $G(j\omega)$;
- Síntesis del pre-filtro $F(j\omega)$;
- Validación del diseño.

4.1.2.1. Modelado de la planta con incertidumbre, generación de plantillas y planta nominal $P_0(j\omega)$

La estrategia de control QFT permite la descripción del modelo dinámico de la planta a controlar desde diferentes representaciones; mediante datos de respuesta frecuencial (dB, Φ, ω), funciones de transferencias lineales, variantes (LTV) o invariantes (LTI) en el tiempo, y, mediante ecuaciones no-lineales, todas estas con incertidumbre paramétrica y/o no paramétrica [27].

Las representaciones de los modelos dinámicos mencionados anteriormente son trasladadas al dominio de la frecuencia, generándose en el diagrama de Nichols una representación fase (Φ)-magnitud (dB) para cada frecuencia de interés ($\omega_i \in \Omega$). Estas, forman un conjunto de puntos (números complejos) para cada planta dentro del espacio de incertidumbre. Dicho conjunto de puntos a cada frecuencia se denomina plantillas $\mathfrak{P}(j\omega_i)$ (*templates*), los cuales describen la dinámica de la planta en cada frecuencia ω_i , y, son más o menos extensos según la incertidumbre asociada a la planta $\mathfrak{P}(j\omega_i) = \{P(j\omega_i), \omega_i \in \Omega\}$ [38]. En resumen, las plantillas son la proyección de la incertidumbre de la planta en el diagrama de Nichols a cada frecuencia de interés.

Para el diseño, se debe escoger una planta P_0 que represente al conjunto de plantas posibles de cada plantilla o *template*. Según [26, 33], se puede elegir cualquier planta de la plantilla como planta nominal y, una vez escogida dicha planta, se debe mantener durante todo el diseño.

4.1.2.2. Definición de especificaciones

El sistema de control definido en la Figura 7 incluye el conjunto de plantas con incertidumbre $\mathfrak{P}(j\omega_i) = \{P(j\omega_i), \omega_i \in \Omega\}$, el controlador $G(j\omega)$ y prefiltro $F(j\omega)$ a diseñar, y la dinámica del sensor $H(j\omega)$. Las entradas al sistema son: la referencia $R(j\omega)$, las perturbaciones $W(j\omega)$, $D_1(j\omega)$ y $D_2(j\omega)$, y el ruido $N(j\omega)$. La variable a controlar es $Y(j\omega)$, el error es $E(j\omega)$ y la señal de control $U(j\omega)$. De la Figura 7 se pueden extraer las ecuaciones (4.1) a (4.3).

$$Y = \frac{1}{1+PGH}D_2 + \frac{P}{1+PGH}D_1 + \frac{PG}{1+PGH}(W+FR) - \frac{PGH}{1+PGH}N \quad (4.1)$$

$$U = \frac{G}{1+PGH}(W+FR) - \frac{GH}{1+PGH}(N+D_2+PD_1) \quad (4.2)$$

$$E = -\frac{H}{1+PGH}D_2 + \frac{PH}{1+PGH}D_1 + \frac{PGH}{1+PGH}W + \frac{1}{1+PGH}FR - \frac{H}{1+PGH}N \quad (4.3)$$

La definición de las especificaciones de estabilidad y comportamiento robusto (rechazo a perturbaciones, seguimiento de referencias, inmunidad al ruido, atenuación de frecuencias de resonancia, etc.) pueden cumplirse en términos de la restricción de las magnitudes de las funciones de transferencia (ecuaciones (4.1) a (4.3)) a las frecuencias deseadas que se presentan en la Tabla 5, $\{|T_k(j\omega_i)| \leq \delta_k(\omega_i), k = 1, \dots, 5\}$.

Tabla 5. Especificaciones (sin perder generalidad, H=1)

k	Especificaciones	Ecu.
1	$ T_1(j\omega) = \left \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)F(j\omega)} \right = \left \frac{U(j\omega)}{D_1(j\omega)} \right = \left \frac{Y(j\omega)}{N(j\omega)} \right = \left \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right \leq \delta_1(\omega), \omega \in \Omega_1$	(4.4)
2	$ T_2(j\omega) = \left \frac{Y(j\omega)}{D_2(j\omega)} \right = \left \frac{1}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right \leq \delta_2(\omega), \omega \in \Omega_2$	(4.5)
3	$ T_3(j\omega) = \left \frac{Y(j\omega)}{D_1(j\omega)} \right = \left \frac{P(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right \leq \delta_3(\omega), \omega \in \Omega_3$	(4.6)
4	$ T_4(j\omega) = \left \frac{U(j\omega)}{D_2(j\omega)} \right = \left \frac{U(j\omega)}{N(j\omega)} \right = \left \frac{U(j\omega)}{R(j\omega)F(j\omega)} \right = \left \frac{G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right \leq \delta_4(\omega), \omega \in \Omega_4$	(4.7)

$$5 \quad \delta_{5inf}(\omega) < |T_5(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} \right| = \left| F(j\omega) \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_{5sup}(\omega), \quad \omega \in \Omega_5 \quad (4.8)$$

$$\left| \frac{G(j\omega)P_d(j\omega)}{G(j\omega)P_e(j\omega)} \right| \left| \frac{1 + G(j\omega)P_e(j\omega)}{1 + G(j\omega)P_d(j\omega)} \right| \leq \delta_5(\omega) = \frac{\delta_{5sup}(\omega)}{\delta_{5inf}(\omega)}, \quad \omega \in \Omega_5 \quad (4.9)$$

- Ecuación (4.4) – **Sensibilidad complementaria del sistema o función T; (k=1):** $|T_1(j\omega)|$ define tres tipos de especificaciones: 1) Estabilidad robusta, 2) Limitación del esfuerzo de control ante la perturbación de entrada a la planta $|U/D_1|$, 3) Atenuación del ruido del sensor $|Y/N|$,
- Ecuación (4.5) – **Sensibilidad del sistema o función S; (k=2):** $|T_2(j\omega)|$ define dos tipos de especificaciones: 1) Rechazo a la perturbación de salida de la planta $[D_2]$. 2) Reducción de la sensibilidad.
- Ecuación (4.6) – **Sensibilidad del sistema o función S'; (k=3):** $|T_3(j\omega)|$ define un tipo de especificación: Rechazo de perturbación a la entrada de la planta $[D_1]$.
- Ecuación (4.7) – **Esfuerzo de control (k=4):** $|T_4(j\omega)|$ define tres tipos de especificaciones: 1) Limitación del esfuerzo de control ante la perturbación de salida de la planta $|U/D_2|$, 2) Atenuación del ruido del sensor $|Y/N|$, 3) Ancho de banda de la referencia $|U/RF|$,
- Ecuación (4.8) – **Seguimiento de señales de referencia (k=5):** $|T_5(j\omega)|$ define solo un tipo de especificación: Seguimiento robusto de la señal de referencia $|Y/R|$.

Estabilidad robusta: En términos de QFT esta se expresa como (Tabla 5: Ecu. 4.4):

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \delta_U, \quad \text{para toda } P \in \wp, \omega_{iW} \in [0, \infty] \quad (4.10)$$

Donde $L(j\omega) = P(j\omega)G(j\omega)$ es la función de transferencia en lazo abierto y δ_U una especificación constante para todas las frecuencias de interés. El cumplimiento de la desigualdad impone un máximo sobre-impulso en la respuesta tanto temporal como frecuencial del sistema en lazo cerrado. Simultáneamente, garantiza unos márgenes de fase (Ecu. 4.11) y ganancia (Ecu. 4.12)

mínimos para todo el conjunto de plantas posibles $P \in \wp$, que establecen el grado de estabilidad de un sistema de control. Estos márgenes pueden calcularse de acuerdo a la especificación constante δ_U que se desea, como se hace en [18].

$$MF = 180^\circ - \cos^{-1}\left(\frac{0.5}{\delta_U} - 1\right) \quad (4.11)$$

$$MG \geq 1 + \frac{1}{\delta_U} \quad (4.12)$$

Para obtener una estabilidad relativamente aceptable en el diseño, se sugiere unos márgenes mínimos de fase y ganancia de 45° y 1.77 (o 5 dB) según [38]. Reemplazando estos valores en las ecuaciones (4.11) y (4.12) se obtiene como resultado un $\delta_U = 1.3$.

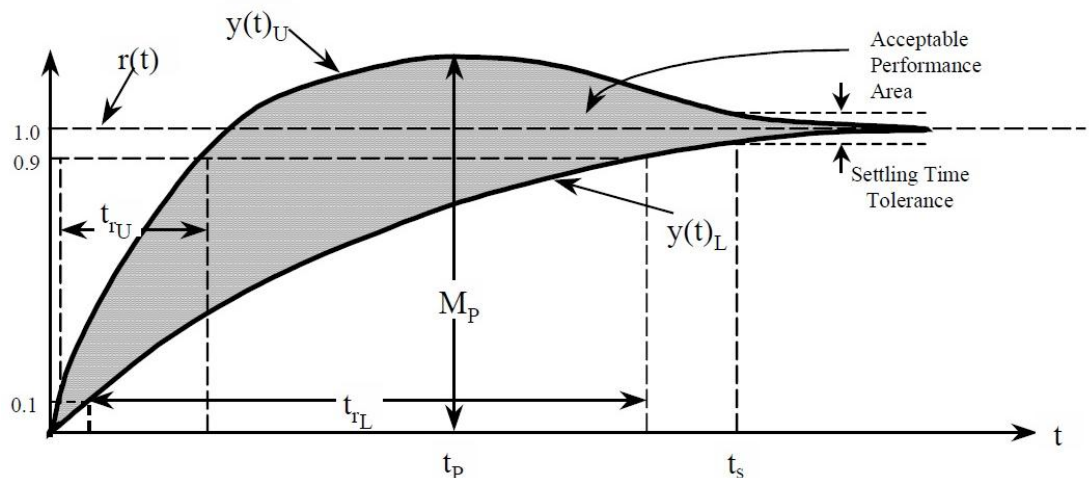
Seguimiento robusto de la señal de referencia: La estrategia de control QFT expresa esta especificación con una doble desigualdad (Tabla 5: Ecu. 4.8):

$$\delta_{RL}(\omega) \leq \left| \frac{F(j\omega) * L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \delta_{RU}(\omega), \quad \text{para toda } P \in \wp \quad (4.13)$$

donde $\delta_{RU}(\omega) = |T_{RU}(j\omega)|$ y $\delta_{RL}(\omega) = |T_{RL}(j\omega)|$.

Para definir $T_{RU}(s)$, que representa un modelo superior de comportamiento ante la señal de referencia y , $T_{RL}(s)$, un modelo inferior; se hace a partir de modelos temporales, en los que se trabaja ante una entrada escalón.

Figura 8. Especificaciones para el seguimiento de referencia en el dominio del tiempo



Fuente: HOUPIS, Constantine H.; RASMUSSEN, Steven J.; GARCIA-SANZ, Mario. Quantitative feedback theory: fundamentals and applications. CRC Press, 2005.

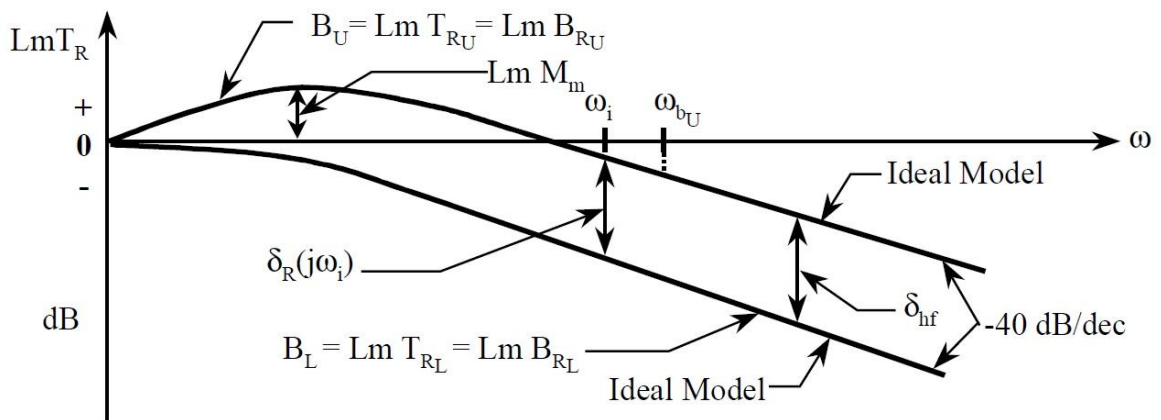
Para el modelo superior $y_U(t)$, $T_{RU}(s)$; se recomienda elegir un comportamiento subamortiguado característico de un sistema de segundo orden y para el modelo inferior $y_L(t)$, $T_{RL}(s)$; se aconseja optar por una dinámica sobreamortiguada. Ambos modelos se pueden determinar desde las especificaciones temporales, tales como el máximo sobreimpulso M_p , el tiempo pico t_p , el tiempo de establecimiento t_s , el tiempo de subida t_r , etc [38]. Como se muestran en la Figura 8. A estos modelos de segundo orden mencionados anteriormente conviene agregar un cero en el modelo superior y un polo al modelo inferior de tal forma que no modifiquen la respuesta temporal, resultando:

$$T_{RU}(s) = \frac{(\omega_n^2/a)(s+a)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.14)$$

$$T_{RL}(s) = \frac{K}{(s+\sigma_1)(s+\sigma_2)(s+\sigma_3)} \quad (5.15)$$

Agregar un cero al modelo superior y un polo al modelo inferior se hace con el objetivo de que sus curvas frecuenciales se separen a medida que aumente la frecuencia (ver Figura 10). Este incremento facilita la sintonización del controlador puesto a que los contornos o *bounds* disminuyen en magnitud [29, 32, 40].

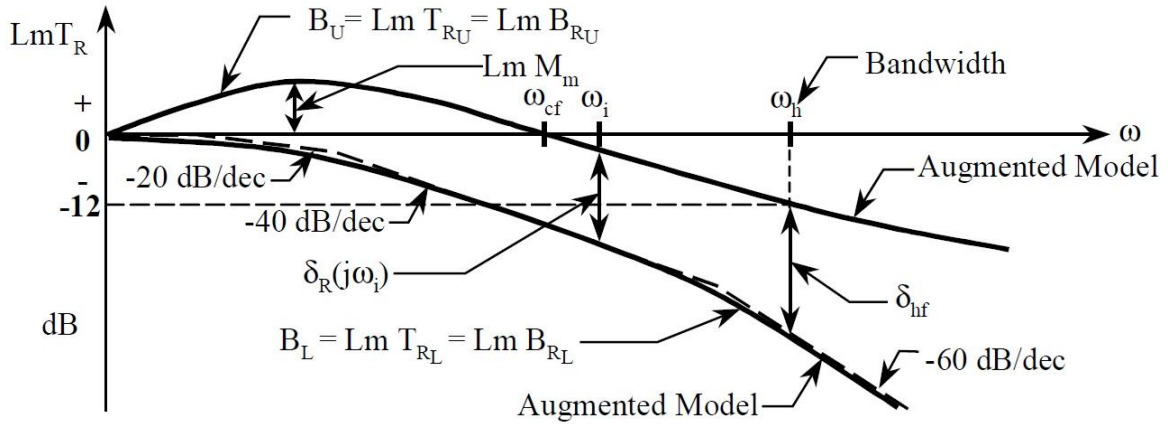
Figura 9. Respuesta en el dominio de la frecuencia de $T_{RU}(s)$ sin agregar el cero y $T_{RL}(s)$ sin adicionar el polo



Fuente: HOUPIS, Constantine H.; RASMUSSEN, Steven J.; GARCIA-SANZ, Mario. *Quantitative feedback theory: fundamentals and applications*. CRC Press, 2005.

En la Figura 9 se puede observar que, si no se agregan el cero y el polo a los modelos, la diferencia frecuencial $\delta_R(j\omega_i)$ es constante a cualquier frecuencia lo que dificulta la sintonización del controlador.

Figura 10. Respuesta en el dominio de la frecuencia de $T_{RU}(s)$ agregando el cero y $T_{RL}(s)$ adicionando el polo



Fuente: HOUPIS, Constantine H.; RASMUSSEN, Steven J.; GARCIA-SANZ, Mario. *Quantitative feedback theory: fundamentals and applications*. CRC Press, 2005.

Donde $LmT_R = 20\log|T_R|$, $B_U = LmT_{RU}$, $B_L = LmT_{RL}$, $\delta_R(j\omega_i)$ es la diferencia en magnitud (dB) de B_U y B_L que se incrementa a medida que aumenta la frecuencia debido a la adición de un cero al modelo superior y de un polo al modelo inferior como se comentó anteriormente.

4.1.2.3. Creación de contornos $B(j\omega)$, (Bounds)

Una vez ya seleccionada la planta nominal $P_0(j\omega)$, la estrategia de control QFT transforma las especificaciones en lazo cerrado (ecuaciones 4.4 a 4.9) y la incertidumbre de la planta $\mathfrak{I}P(j\omega)$ en un conjunto de curvas de restricción o contornos $B(j\omega)$ (Horowitz-Sidi Bounds), existiendo uno para cada frecuencia de interés $\omega_i \in \Omega$ y para cada tipo de especificación [38]. Es decir, existen contornos de estabilidad robusta $B_U(j\omega_i)$, comportamiento robusto, para el seguimiento de referencia $B_R(j\omega_i)$ y, para el rechazo de perturbaciones $B_D(j\omega_i)$.

Expresando las ecuaciones (4.4) a (4.9) en forma polar, donde a cada frecuencia de interés cada planta es $P(j\omega_i) = p \angle \theta$, y el controlador es $G(j\omega_i) = g \angle \phi$, con $\phi \in [-2\pi, 0]$, las especificaciones dadas $\{|T_k(j\omega_i)| \leq \delta_k(\omega_i), k = 1, \dots, 5\}$, son trasladadas respectivamente a las inecuaciones cuadráticas presentadas en la siguiente tabla [18].

Tabla 6. Inecuaciones cuadráticas en g

k	Inecuación	Ecu.
---	------------	------

1	$p^2 \left(1 - \frac{1}{\delta_1^2}\right) g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + 1 \geq 0$	(5.1 6)
2	$p^2 g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + \left(1 - \frac{1}{\delta_1^2}\right) \geq 0$	(5.1 7)
3	$p^2 g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + \left(1 - \frac{p^2}{\delta_3^2}\right) \geq 0$	(5.1 8)
4	$\left(p^2 - \frac{1}{\delta_4^2}\right) g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + 1 \geq 0$	(5.1 9)
5	$P_e^2 P_d^2 \left(1 - \frac{1}{\delta_1^2}\right) g^2 + 2 P_e^2 P_d^2 \left(P_e^2 \cos(\phi + \theta_d) - \frac{P_d}{\delta_5^2} \cos(\phi + \theta_e)\right) g + \left(P_e^2 - \frac{P_d^2}{\delta_5^2}\right) \geq 0$	(5.2 0)

La fórmula general de dichas inecuaciones, donde p , θ y δ_k son conocidas, ϕ varía entre $[-2\pi, 0]$ radianes, y g es la incógnita, se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_{\omega_i}^k(p, \theta, \delta_k, \phi) = a g^2 + b g + c \geq 0 \quad (5.21)$$

Para obtener más detalle del algoritmo creado por Chait y Yaniv en 1993, que da solución a estas inecuaciones de contornos y explica la tipología de estos, mirar [18].

Finalmente, a los contornos calculados y dibujados sobre el diagrama de Nichols para cada frecuencia de interés y cada especificación, se les determina la intersección escogiendo el contorno más desfavorable entre los que representan cada especificación $B(j\omega_i)$.

4.1.2.4. Síntesis del controlador (loop-shaping) $G(j\omega)$

Una vez ya dibujados los contornos de intersección en el diagrama de Nichols y, superpuesta la función de transferencia en lazo abierto $L_0(s) = P_0(s) * G(s)$ ($G = 1$ inicialmente), el controlador $G(j\omega)$ se diseña añadiendo ganancia, polos y ceros hasta que la función $L_0(s)$ a cada frecuencia de interés $\omega_i \in \Omega$, satisfaga su correspondiente contorno [38] (es decir, si es un contorno con línea continua debe ubicarse por encima o sobre este, y, si es un contorno con línea discontinua debe situarse por debajo de este).

Según [30], el controlador óptimo será aquel que teniendo mínima ganancia consiga que $L_0(s)$ cumpla las especificaciones expuestas por los contornos en cada frecuencia de interés. Ante este caso se podrá afirmar que el sistema de control satisface las especificaciones deseadas para el conjunto de plantas con incertidumbre.

4.1.2.5. Síntesis del pre-filtro $F(j\omega)$

Si el sistema de control necesita especificaciones de seguimiento de referencia (*reference tracking*), entonces será necesario el diseño de un pre-filtro $F(j\omega)$. Así como el objetivo del controlador $G(j\omega)$ es minimizar la incertidumbre y cumplir especificaciones de estabilidad robusta, comportamiento robusto, rechazo de perturbaciones, etc., el objetivo del pre-filtro es el cumplimiento de las especificaciones de seguimiento de referencia [27].

4.1.2.6. Validación del diseño

Una vez que se ha finalizado tanto el diseño del controlador $G(j\omega)$ como el del pre-filtro $F(j\omega)$, es necesario analizar su comportamiento frente a las especificaciones deseadas, tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo para todas las plantas posibles $P(s)$. Si todos los conjuntos de plantas posibles en el espacio de los parámetros cumplen las especificaciones deseadas mencionadas anteriormente se ha de proceder a la implementación industrial, de lo contrario si estas especificaciones no se satisfacen se debe hacer una redefinición de estas [31].

4.2. OBSERVADOR DE PERTURBACIONES

4.2.1. Introducción

Las perturbaciones están siempre presentes en los sistemas de control industriales y traen como consecuencia un funcionamiento adverso al control de estos. Por lo tanto, el rechazo de perturbaciones es uno de los objetivos principales en el diseño del controlador. Cuando se habla de perturbaciones, no solo se hace referencia a la dinámica externa al sistema de control, sino que también se refiere a la incertidumbre de la planta, incluyendo también las dinámicas no modeladas [37].

El control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC por las siglas en inglés *Active Disturbance Rejection Control*) puede ser

implementado en el control de sistemas lineales y no lineales con perturbación asociada. El objetivo principal es la estimación precisa de la parte desconocida de la dinámica del sistema a ser controlado y proceder a cancelar sus efectos disminuyendo el esfuerzo de control [49].

Existen diversas técnicas para el diseño de observadores de perturbaciones, este trabajo de grado se concentra en la estrategia para obtener un observador lineal de perturbaciones.

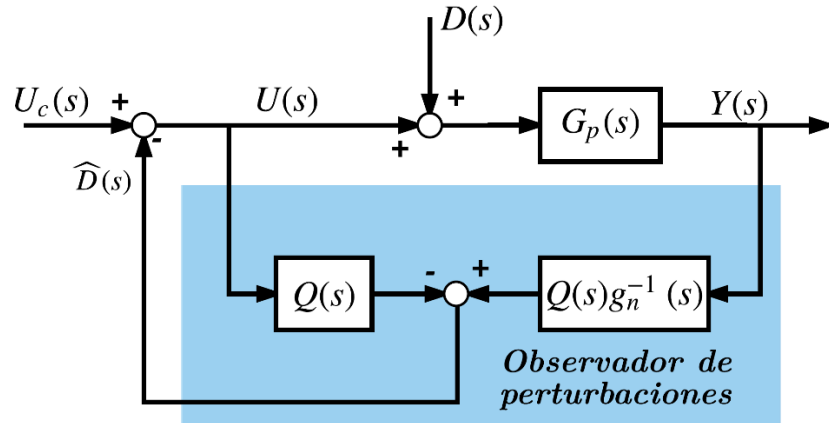
4.2.2. Observador lineal de perturbaciones (DOB)

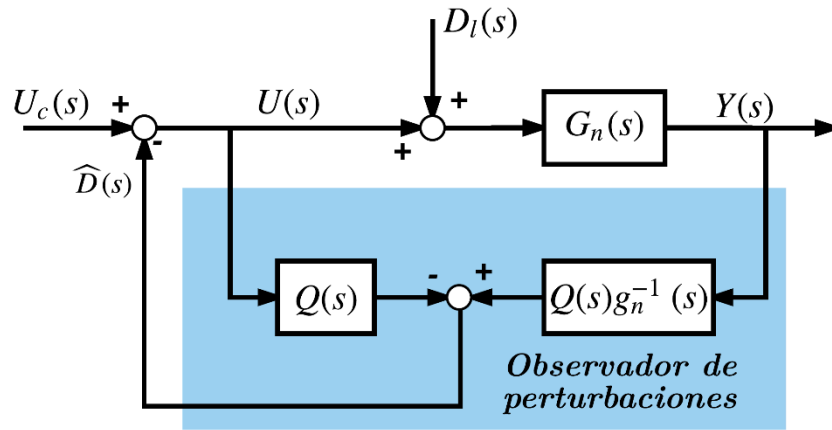
Considerando un sistema en el dominio de la frecuencia con su respectiva entrada, salida y con sus perturbaciones asociadas (Figura 11.a). Se puede definir de la siguiente manera:

$$Y(s) = G_p(s)[U(s) + D(s)] \quad (4.22)$$

Donde $U(s)$ es la señal de control o entrada a la planta, $Y(s)$ es la salida del sistema, $D(s)$ es la perturbación asociada al proceso y $G_p(s)$ es el modelo de la planta.

Figura 11. Sistema de control con DOB: a) modelo real, b) modelo nominal





En la Figura 11.a representa el sistema de control con el observador de perturbaciones, donde $G_n(s)$ es el modelo nominal de la planta y $Q(s)$ es el filtro del observador de perturbaciones. Cabe resaltar que el observador no solo estima las perturbaciones externas, sino que también estima las perturbaciones internas causadas por la incertidumbre en el modelo de la planta como se muestra en la Figura 11.b [37].

Del sistema de control de la Figura 11.b se puede decir que:

$$D_l(s) = G_n^{-1}(s)G_p(s)D(s) + [G_n^{-1}(s)G_p(s) - 1]U(s). \quad (4.23)$$

Igualmente, que:

$$\begin{aligned} \hat{D}(s) &= Q(s)G_n^{-1}(s)Y(s) - Q(s)U(s) \\ &= Q(s)G_n^{-1}(s)G_n(s)(U(s) + D_l(s)) - Q(s)U(s) \\ &= Q(s)D_l(s) \end{aligned} \quad (4.24)$$

A partir de las ecuaciones (4.23) y (4.24) se tiene que:

$$E_d(s) = \hat{D}(s) - D_l(s) = [Q(s) - 1]D_l(s) \quad (4.25)$$

$E_d(s)$ es el error de estimación de la perturbación, este error tenderá a cero a medida que el tiempo tienda a infinito si el filtro $Q(s)$ se selecciona como un filtro pasa bajas, entonces es decir que, $\lim_{s \rightarrow 0} Q(s) = 1$.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y a la Figura 11.a se puede representar la salida de la siguiente manera:

$$Y(s) = G_{uy}(s)U_c(s) + G_{dy}(s)D(s) \quad (4.26)$$

Donde:

$$G_{uy}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)}{G_n(s) + Q(s)[G_p(s) - G_n(s)]} \quad (4.27)$$

$$G_{dy}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)[1 - Q(s)]}{G_n(s) + Q(s)[G_p(s) - G_n(s)]} \quad (4.28)$$

Si el filtro $Q(s)$ es seleccionado como pasa bajas, es decir, $\lim_{\omega \rightarrow 0} Q(j\omega) = 1$, se concluye a partir de las ecuaciones 4.27 y 4.28 que:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} G_{uy}(j\omega) = G_n(j\omega) \quad (4.29)$$

Y,

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} G_{dy}(j\omega) = 0 \quad (4.30)$$

La ecuación 4.29 implica que el sistema con observador de perturbaciones se comporta a bajas frecuencias como la planta nominal. De la ecuación 4.30 se puede concluir que las perturbaciones a bajas frecuencias han sido atenuadas en el sistema.

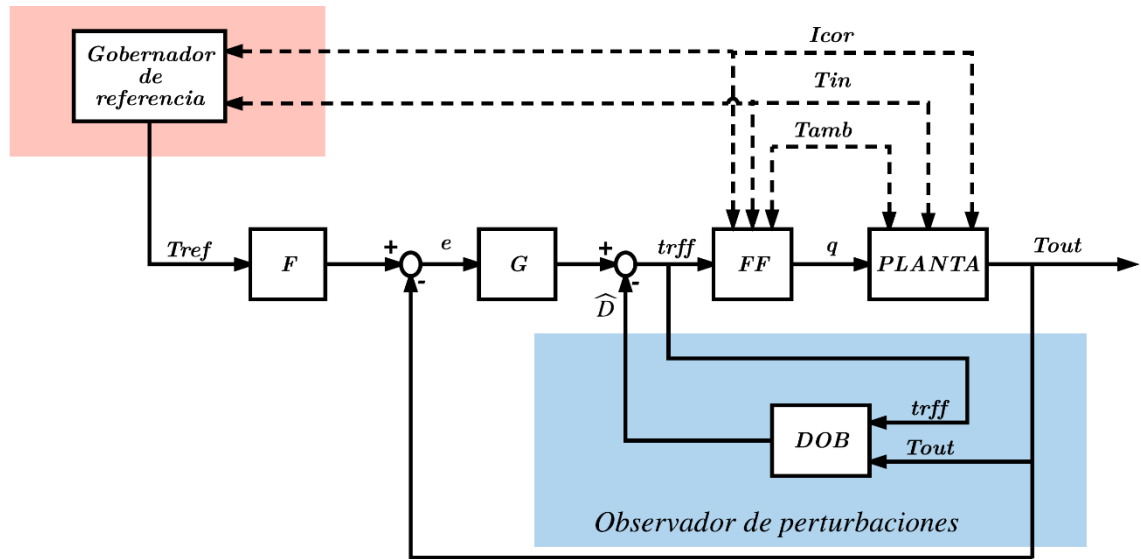
De acuerdo a las ecuaciones 4.25 y 4.30, se puede ver que el desempeño de la estimación de la perturbación depende principalmente por el diseño del filtro pasa bajo $Q(s)$. El cual tiene que ser diseñado de tal manera que:

- El grado relativo de $Q(s)$, es decir, la diferencia de orden entre el denominador y el numerador, no debe ser menor que el grado relativo del modelo nominal de la planta $G_n(s)$. Este principio de diseño es para asegurarse de que la estructura de control es realizable, es decir, $Q(s)$ y $G_n^{-1}(s)$ debe ser adecuada.
- En el dominio de baja frecuencia, $Q(s)$ se acerca a 1, lo que garantiza que la estimación de la perturbación sea muy buena, esto significa que los efectos producidos por las perturbaciones pueden ser atenuados por el observador de perturbaciones.

5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

En este capítulo se presenta el diseño e implementación del esquema de control robusto propuesto para el control del campo de colectores solares distribuidos ACUREX (Figura 12). Como se mencionó anteriormente, la estructura de control comprende el diseño de un controlador de parámetros fijos aplicando la técnica de control robusto QFT, el diseño de un observador lineal de perturbaciones y , con el objetivo de establecer una señal de referencia que mantenga la temperatura de salida del aceite lo más alta posible (teniendo en cuenta las condiciones ambientales y las restricciones de operación), se incorpora un gobernador de referencia basado en lógica difusa.

Figura 12. Esquema de control con observador de perturbaciones y gobernador de referencia



5.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR QFT

Para el diseño del controlador se utilizó como herramienta principal de diseño, la toolbox desarrollada por el profesor Mario García-Sanz, "The QFT Control Toolbox (QFTCT) for Matlab®", versión 10.01, 2016 [28].

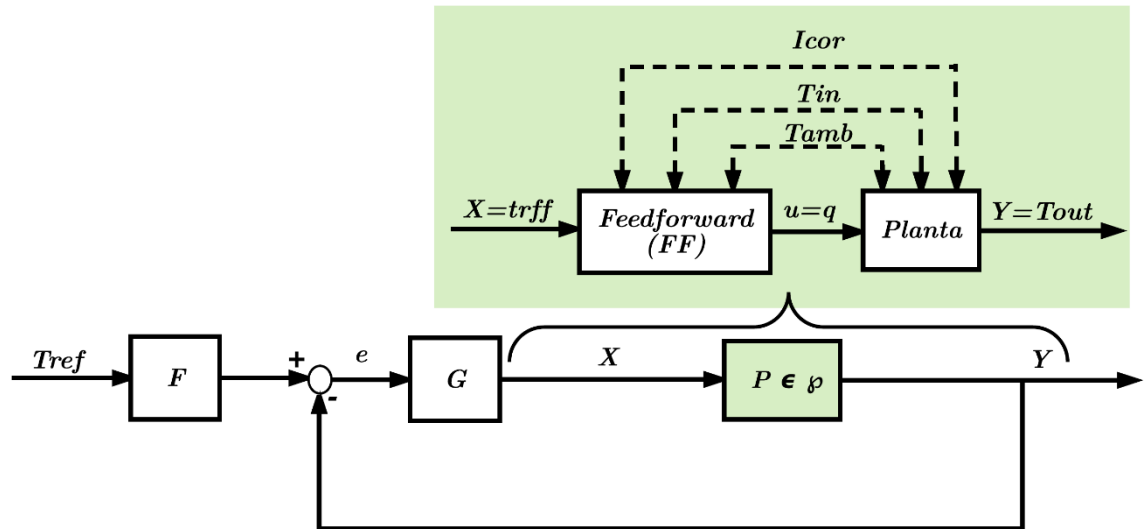
5.1.1. Modelado de la planta con incertidumbre, generación de plantillas y planta nominal $P_0(j\omega)$

5.1.1.1. Modelado de la planta con incertidumbre

Es de vital importancia identificar un modelo de la planta con incertidumbre paramétrica que represente el comportamiento de esta ante las diferentes condiciones de operación durante un día de funcionamiento habitual. Para obtener el modelo con incertidumbre, se tuvo en cuenta el *feedforward* en serie [3] como parte de la planta (Figura 13). Se definieron diferentes valores de entrada escalón tanto para la temperatura de referencia del *feedforward* (t_{rff}), como para la radiación solar (I), temperatura de entrada del fluido (T_{in}) y temperatura ambiente (T_{amb}), considerando los diferentes puntos de funcionamiento y se evaluó la temperatura de salida del aceite del campo. Después de realizadas las pruebas en el software de simulación del campo [5], se observaron las variaciones en la ganancia de la planta y constantes de tiempo. De esta forma, se obtuvo un conjunto de funciones de transferencia de

primer orden con retardo que definen el comportamiento de la planta.

Figura 13. Sistema de control incluyendo el *feedforward* en serie como planta con incertidumbre paramétrica



El modelo lineal resultante con incertidumbre paramétrica de la planta (*feedforward*+planta) se define como sigue:

$$\wp(s) = \left\{ P(s) = \frac{K}{\tau S + 1} e^{-\tau_d s} : \tau_d = 39s, \tau \in [75, 525], K \in [0.8, 1.05] \right\} \quad (5.1)$$

5.1.1.2. Planta nominal $P_0(j\omega)$

La selección de la planta nominal sobre la cual se desarrolla la técnica QFT es indiferente [6, 33, 38], así que es posible seleccionar la que se crea más conveniente para el diseño. Por consiguiente, se seleccionó la siguiente planta como planta nominal:

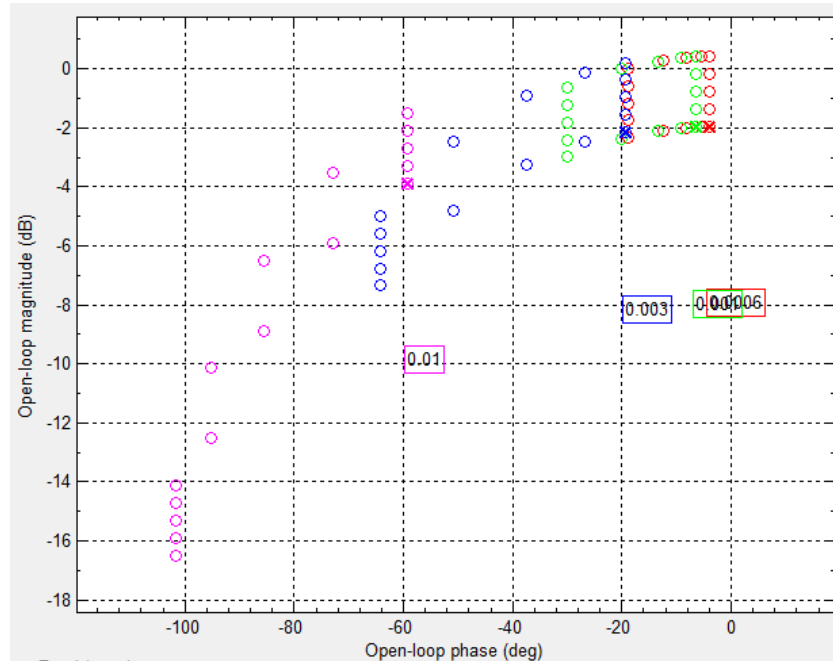
$$P_0(s) = \frac{0.8}{75S + 1} e^{-39s} \quad (5.2)$$

5.1.1.3. Generación de plantillas (*templates*)

La selección del conjunto de frecuencias de interés para el cálculo de los *templates* y, posteriormente para la generación de los contornos, se hizo seleccionando aquellas frecuencias que capturarán una variación en la forma del *template* y en las especificaciones a través del ancho de banda. Resultando:

$$\omega = [0.0006, 0.001, 0.003, 0.01]$$

Figura 14. Representación de las plantillas (*templates*) de acuerdo a las frecuencias de interés



La Figura 14 muestra la representación mediante *templates* de la incertidumbre frecuencial del sistema, definido en (5.1) en el dominio de Laplace.

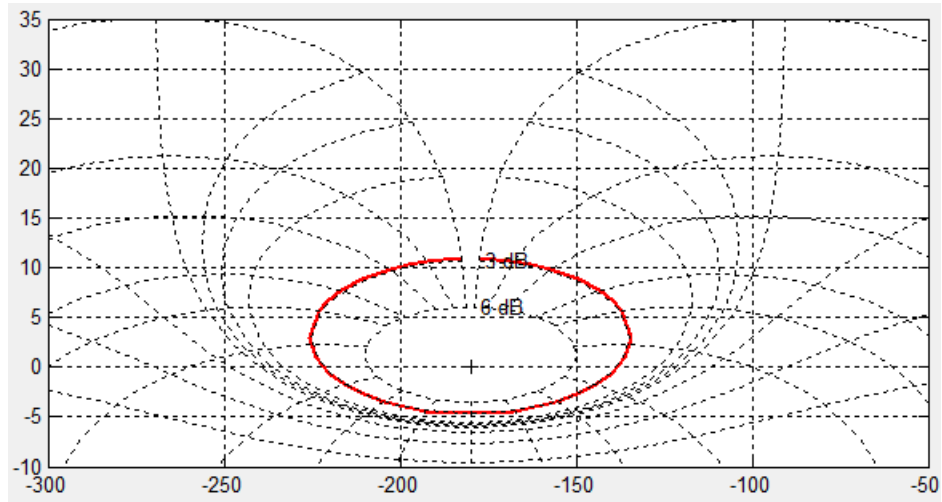
5.1.2. Definición de especificaciones

5.1.2.1. Especificación de estabilidad robusta

Con el fin de obtener márgenes mínimos de ganancia y fase de $MG = 4.68 \text{ dB}$ y $MF = 42^\circ$ respectivamente. Aplicando las Ecuaciones 4.11 y 4.12 resulta una tolerancia $\delta_U = 1.4$

$$\left| \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1 + P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq 1.4 \quad (5.3)$$

Figura 15. Especificación de estabilidad robusta en diagrama de Nichols



5.1.2.2. *Especificaciones de seguimiento de referencia*

Para las especificaciones de seguimiento, se definió un comportamiento deseado para el sistema en lazo cerrado, estableciendo un sobreimpulso máximo de 20% y, un tiempo máximo de establecimiento de 35 minutos. Los modelos $T_{RU}(s)$ y $T_{RL}(s)$ en el dominio frecuencial seleccionados fueron:

$$T_{RU}(s) = \frac{0.002947s + 1.199 * 10^{-5}}{s^2 + 0.00381s + 1.199 * 10^{-5}} \quad (5.4)$$

$$T_{RL}(s) = \frac{5.487 * 10^{-7}}{s^3 + 0.09444 s^2 + 0.0004061s + 5.487 * 10^{-7}} \quad (5.5)$$

Figura 16. Respuesta temporal de $T_{RU}(s)$ y $T_{RL}(s)$

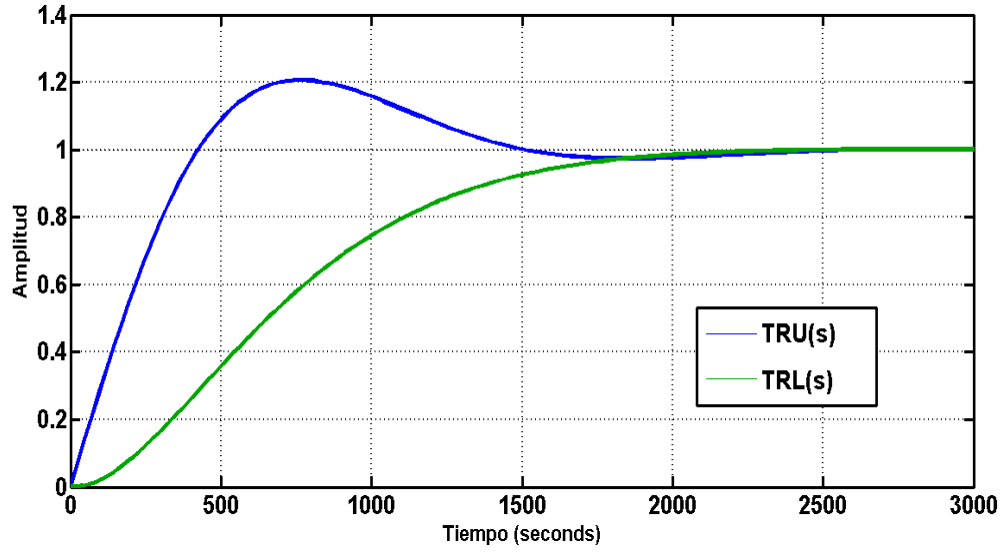


Figura 17. Respuesta frecuencial de $T_{RU}(s)$ y $T_{RL}(s)$

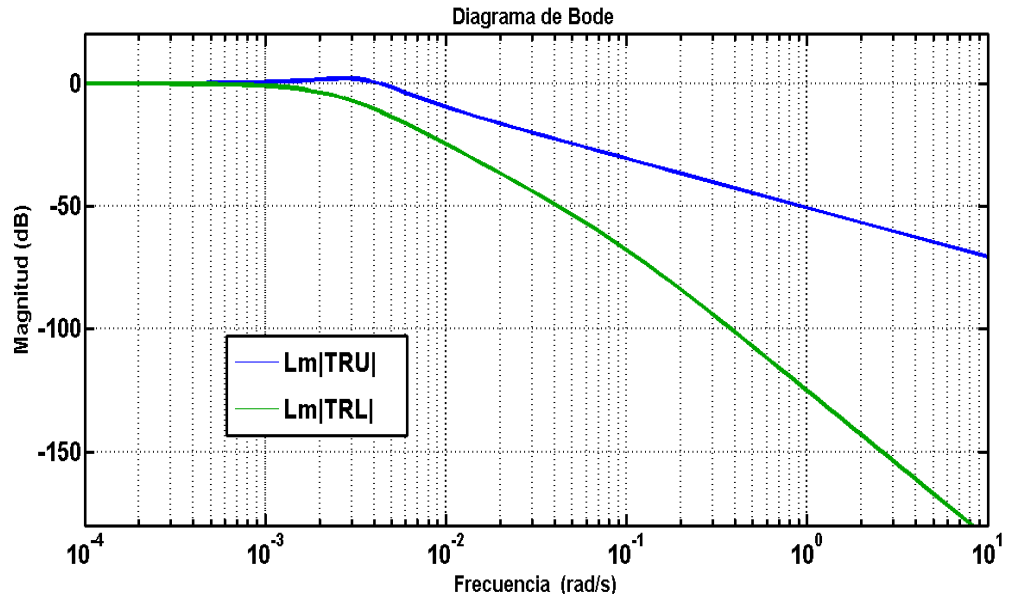
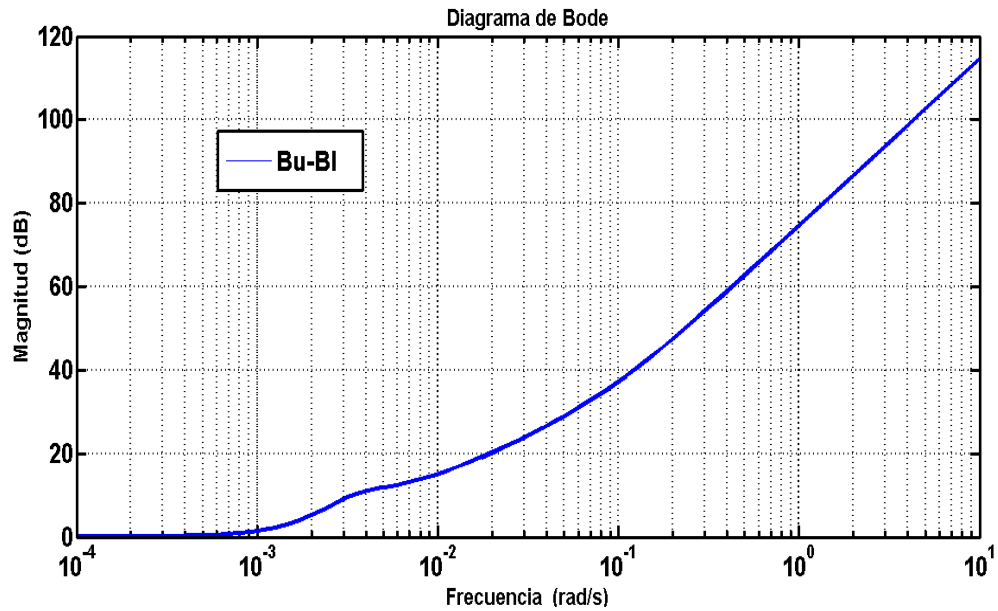


Figura 18. Diferencia frecuencial de $B_U = LmT_{RU}$ y $B_L = LmT_{RL}$, $\delta_R(j\omega_i) = B_U - B_L$



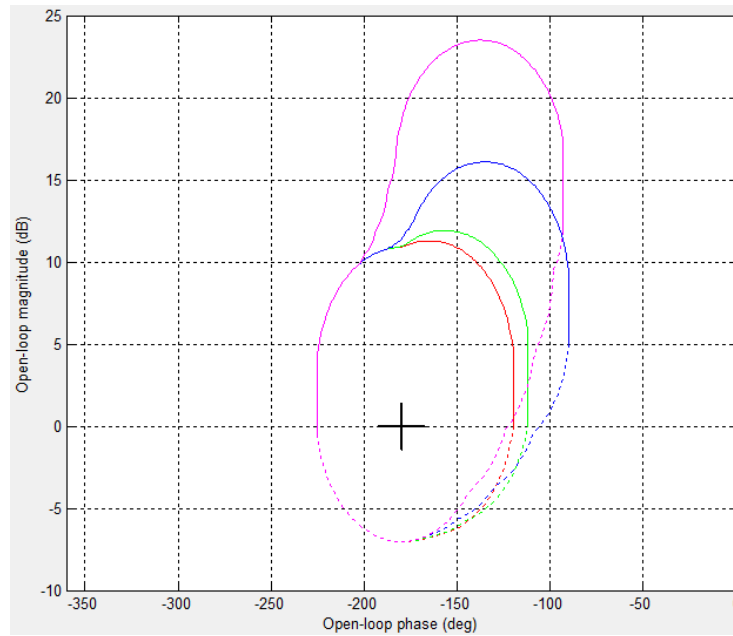
5.1.3. Creación de contornos (*bounds*) $B(j\omega)$

Habiendo establecido las especificaciones robustas de comportamiento en el dominio frecuencial, se calculan los contornos para la función de transferencia de lazo abierto nominal L_0 y se representan en el diagrama de Nichols.

5.1.3.1. Contornos de estabilidad robusta

En la Figura 19 se muestra la zona prohibida en torno a $0\text{dB} \angle -180^\circ$ que L_0 debe satisfacer para garantizar un margen de ganancia de 4.68dB y un margen de fase de 42° para todas las frecuencias en el dominio de incertidumbre. Los contornos de color rojo, verde, azul y violeta, corresponden respectivamente a las frecuencias de interés 0.0006 , 0.001 , 0.003 y 0.01 [rad/s] definidas anteriormente.

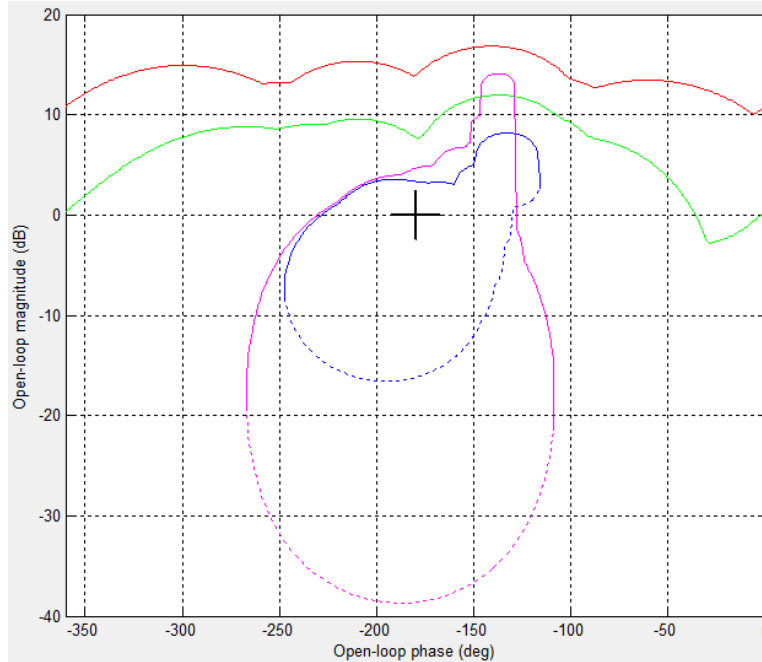
Figura 19. Contornos de estabilidad robusta



5.1.3.2. Contornos de seguimiento de referencia

La Figura 20 muestra los contornos para L_0 que representan la especificación robusta de seguimiento de referencia. Los contornos de color rojo, verde, azul y violeta, corresponden respectivamente a las frecuencias de interés 0.0006, 0.001, 0.003 y 0.01 [rad/s] definidas anteriormente.

Figura 20. Contornos de seguimiento de referencia



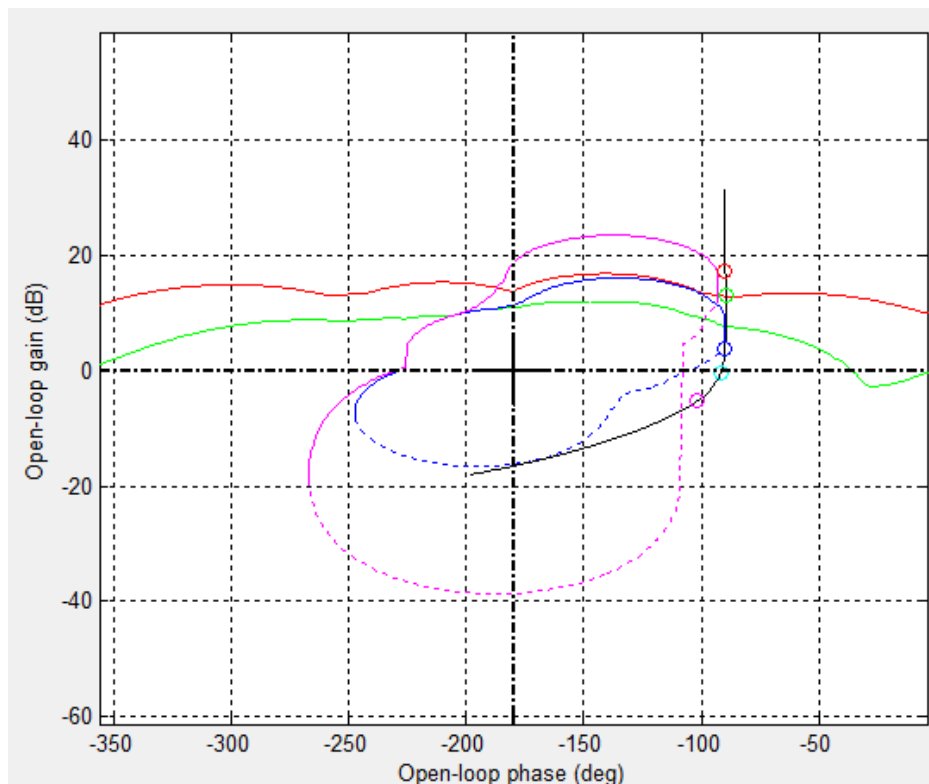
5.1.4. Síntesis del controlador $G(j\omega)$

El controlador resultante sintetizado $G(s)$ con el objetivo de garantizar el cumplimiento de las especificaciones robustas de estabilidad y de seguimiento de referencia para el conjunto de plantas es el siguiente:

$$G(s) = \frac{0.55556(s + 0.018)(s + 0.0077)}{s(s + 0.014)} \quad (5.6)$$

La Figura 21 exhibe que, tanto las especificaciones de estabilidad y de seguimiento de referencia, son cumplidas a cabalidad para todas las frecuencias de interés.

Figura 21. Síntesis del controlador (*loop shaping*) $L_0(j\omega)$

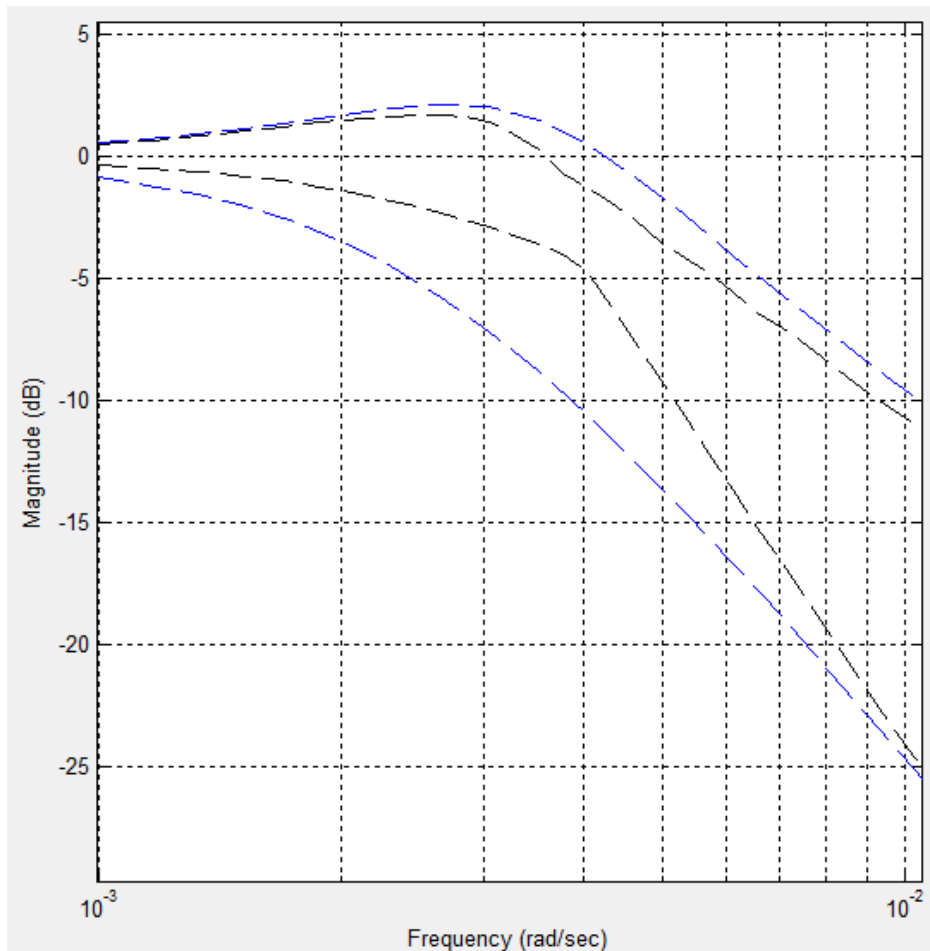


5.1.5. Síntesis del pre-filtro $F(j\omega)$

En la Figura 22 se puede evidenciar el cumplimiento de posicionar a $T_R(j\omega)$ dentro de las especificaciones dadas $B_U(j\omega)$ y $B_L(j\omega)$. La función de transferencia del pre-filtro diseñado es:

$$F(s) = \frac{0.0067}{s + 0.0067} \quad (5.7)$$

Figura 22. Síntesis del pre-filtro $F(j\omega)$

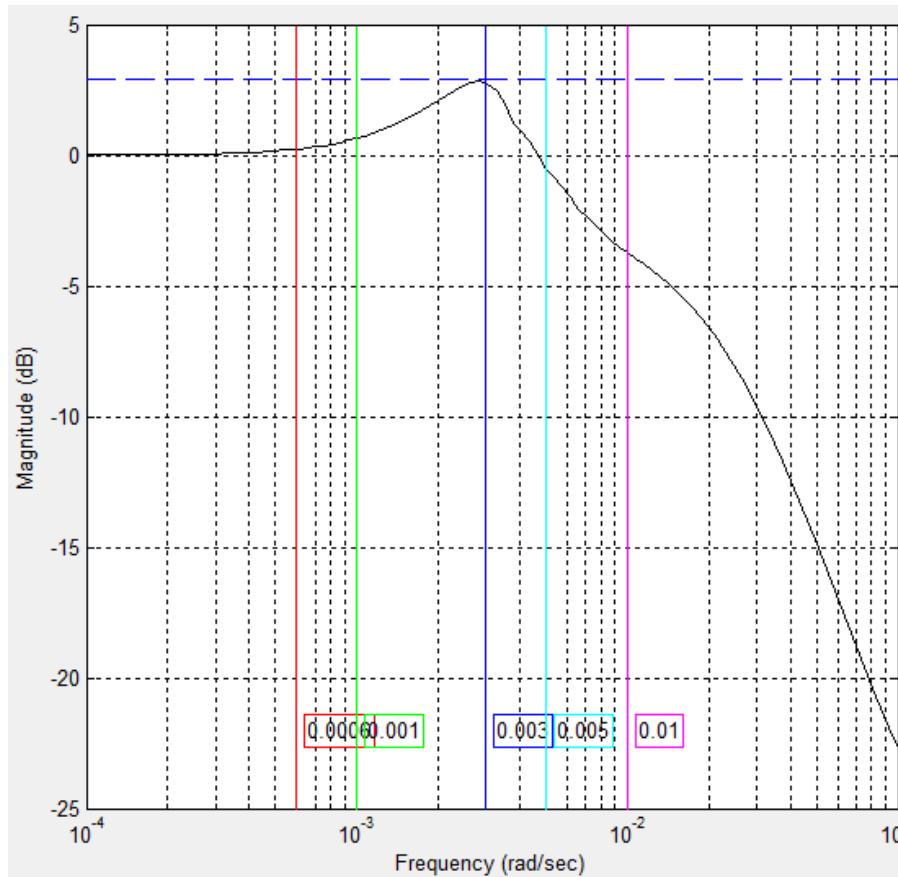


5.1.6. Validación del diseño

Una vez ya diseñado el controlador $G(s)$ y el pre-filtro $F(s)$, se simula el sistema controlado con todas las plantas posibles $P(s)$ del espacio de parámetros, para luego analizar el cumplimiento de las especificaciones deseadas en todos los casos posibles, y así poder validar el controlador obtenido.

5.1.6.1. Validación frecuencial

Figura 23. Comprobación de la especificación de estabilidad robusta



En la Figura 23 se detalla el cumplimiento de la especificación de estabilidad robusta en todas las plantas posibles $P(s)$ en cada frecuencia de interés, verificado dicho cumplimiento se valida el controlador diseñado.

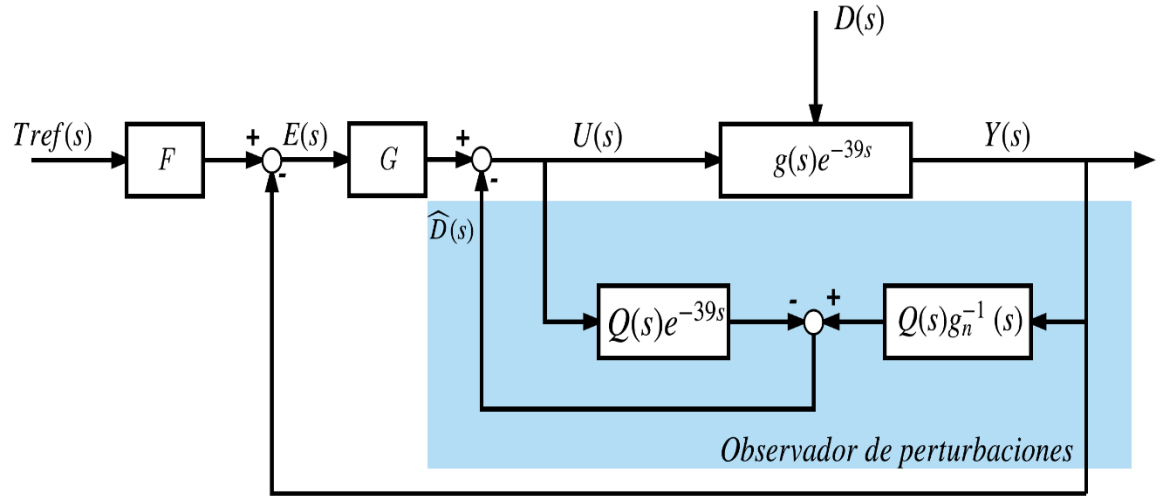
5.1.6.2. Validación temporal

Para la validación temporal según [38], no existe una transformación exacta del dominio frecuencial al temporal. Debido a esto, cumplidas las especificaciones frecuenciales puede ocurrir que en algunas plantas del espacio de parámetros no se cumplan las especificaciones temporales.

5.2. DISEÑO DEL OBSERVADOR DE PERTURBACIONES (DOB)

Como se mencionó en el capítulo 2, este tipo de plantas presenta comportamientos altamente no lineales y están expuestas a grandes perturbaciones (variaciones en las condiciones ambientales), además de existir incertidumbre en el modelado de ellas. Con el fin de atenuar el efecto de las perturbaciones e incertidumbre del sistema, se planteó el diseño de un observador lineal de perturbaciones.

Figura 24. Esquema de control con el observador de perturbaciones



De la Figura 24 se puede deducir que la estimación de las perturbaciones $\hat{D}(s)$ para el sistema está dada por:

$$\hat{D}(s) = U(s) * g(s) * e^{-39s} * g_n^{-1}(s) * Q(s) - U(s) * Q(s) * e^{-39s} \quad (5.8)$$

$$\frac{\hat{D}(s)}{U(s)} = Q(s) * e^{-39s} * \left(\frac{g(s)}{g_n(s)} - 1 \right) \quad (5.9)$$

Por lo tanto, la estimación de las perturbaciones depende del cociente entre el modelo de la planta real del proceso y el modelo nominal seleccionado para el diseño.

5.2.1. Selección de la planta nominal $G_n(s)$

La planta nominal seleccionada fue la siguiente:

$$G_n(s) = \frac{0.8}{75s + 1} e^{-39s} \quad (5.10)$$

Entonces $g_n(s)$ es:

$$g_n(s) = \frac{0.8}{75s + 1} \quad (5.11)$$

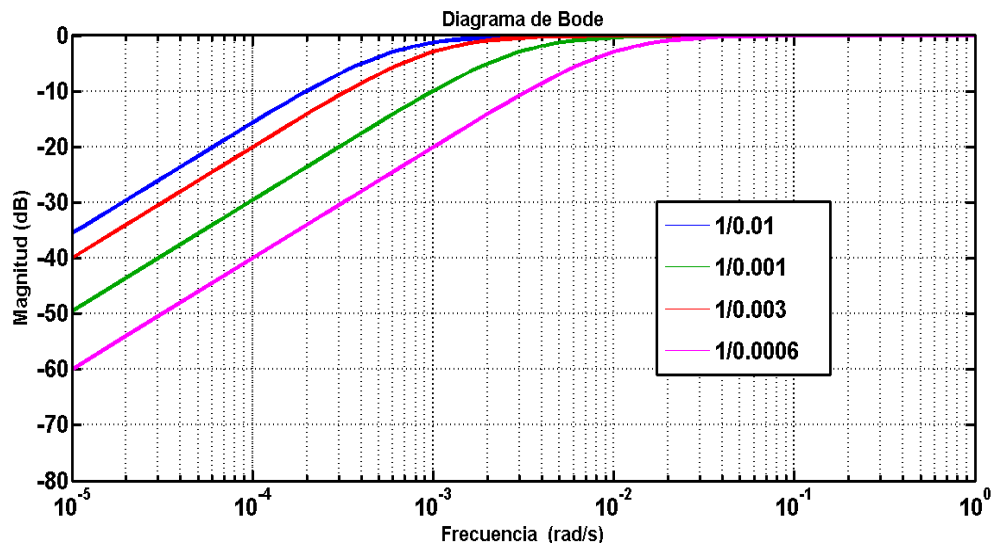
5.2.2. Selección del filtro $Q(s)$

Para la selección del filtro se tuvieron en cuenta los criterios mencionados en el capítulo anterior, de acuerdo a esto se seleccionó un filtro pasa bajas como se muestra a continuación:

$$Q(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}, \quad \lambda > 0 \quad (5.12)$$

La selección de un λ adecuado para el filtro, se realizó a partir de la función de transferencia $1 - Q(s)$.

Figura 25. Función de transferencia $1 - Q(s)$ con diferentes parámetros de λ



En la Figura 25 se puede observar que el parámetro λ corresponde a las frecuencias de interés tomadas para el desarrollo de la técnica QFT. Para el diseño del filtro se definió $\lambda = 1/0.001$, resultando el filtro pasa bajas:

$$Q(s) = \frac{0.001}{s + 0.001} \quad (5.13)$$

Una vez seleccionado tanto la planta nominal como el filtro $Q(s)$, se procede a realizar la respectiva simulación de estos, la cual es presentada en el capítulo siguiente.

5.3. DISEÑO DEL GOBERNADOR DE REFERENCIA

La principal función de un gobernador de referencia es la de reemplazar el rol del operador, quien proporciona una temperatura de referencia lo más óptima posible analizando las condiciones de operación y , haciendo uso de su experticia y conocimiento de las características estáticas y dinámicas del sistema. La lógica difusa es una metodología que imita el razonamiento humano [34], por esta razón, ha sido elegida para el diseño del gobernador de referencia.

En primera instancia, para el diseño del gobernador de referencia basado en lógica difusa (FRG), se seleccionaron las variables que más afectan la dinámica del sistema, teniendo entonces: la radiación solar directa corregida (I_{corr}) y la temperatura de entrada del aceite (T_{in}) como principales variables de decisión. Además, con ansias de dar provecho a la información proporcionada por el DOB, también se tuvo en cuenta la estimación (\hat{D}) como variable de decisión. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos ante los diferentes diseños de FRG, teniendo en cuenta diferentes combinaciones de las variables de decisión.

Tabla 7. Resultados obtenidos de los diseños propuestos

	Resultados no satisfactorios	Resultados satisfactorios
$I_{corr}, T_{in}, \hat{D}$		x^*
I_{corr}, \hat{D}	x	
I_{corr}, T_{in}		x^*

x^* = Presentan resultados muy similares

Al hacer la implementación en el simulador del campo ACUREX del FRG que en cuyo diseño fueron tomadas como variables de decisión I_{corr} y \hat{D} , los resultados obtenidos no fueron buenos, puesto a que se presentaban sobreoscilaciones no deseadas en la temperatura de referencia y , no se cumplía con las condiciones de seguridad de la planta.

De la ecuación (5.9) se tiene que:

$$\frac{G_p(s)}{G_n(s)} = \frac{\frac{k}{ts+1}}{\frac{k_n}{t_n s+1}} = \frac{k(t_n s+1)}{k_n(ts+1)} \quad (5.14)$$

Como se puede observar en la ecuación (6.14), la estimación hecha por el DOB depende de los parámetros k y t ($\hat{D} = f(k, t)$, $k(I_{corr}, T_{in})$, $t(I_{corr}, T_{in})$); debido a esto, k y t pueden tener el mismo valor para diferentes puntos de operación (combinaciones de I_{corr} y T_{in}). Como consecuencia, la estimación \hat{D} suministrada por el DOB no entrega una buena información al FRG.

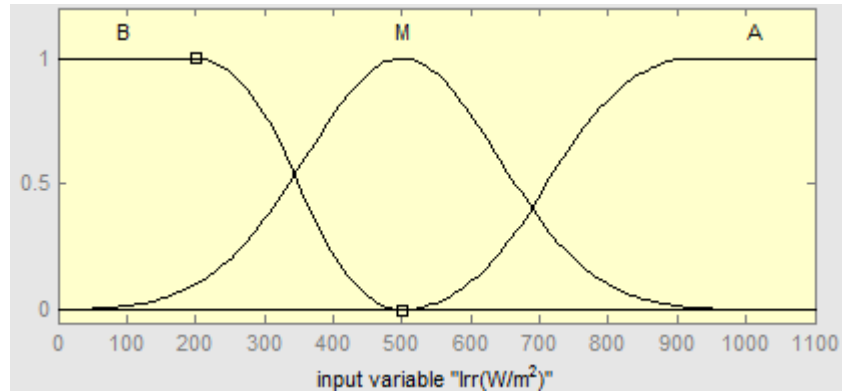
Las pruebas realizadas usando el FRG con I_{corr}, T_{in} y \hat{D} como variables de decisión; y, aquellas hechas teniendo en cuenta solo I_{corr} y T_{in} , presentan ambos resultados buenos y muy similares. Esto se debe a que, como se mencionó antes, la estimación \hat{D} no provee información buena para el cálculo de la referencia de temperatura, y el FRG da prioridad a las otras dos variables de decisión (I_{corr} y T_{in}). Además, la complejidad del diseño se incrementa significativamente a medida que se incluyen variables de decisión, razón por la cual se decidió optar por el diseño del FRG usando I_{corr} y T_{in} .

El diseño del gobernador de referencia se realizó en la *toolbox* "Fuzzy Logic Toolbox™" de Matlab®. Para este, se tuvieron en cuenta las restricciones impuestas por seguridad para la planta ($\Delta T = T_{out} - T_{in} \leq 80^\circ\text{C}$ y $2 \text{ l/s} \leq \dot{q} \leq 12 \text{ l/s}$).

5.3.1. Funciones de pertenencia

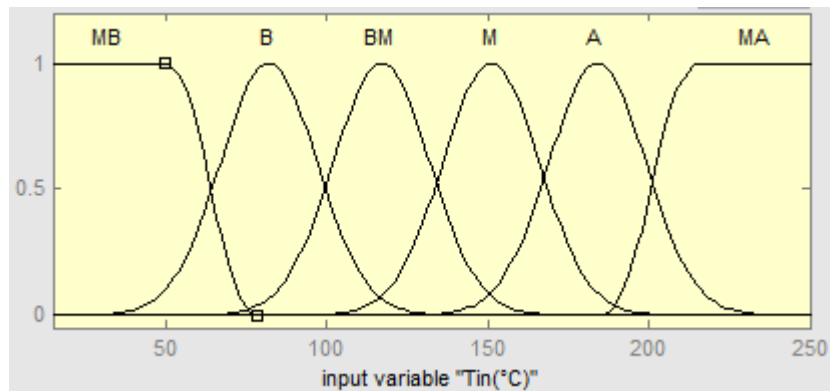
Las funciones de pertenencia para las variables de decisión o entradas I_{corr} y T_{in} , se muestran en la Figura 26 y Figura 27 respectivamente, y, para la salida T_{ref} , se muestra en la Figura 28. Estas, fueron seleccionadas del tipo gaussianas (ver Anexo A) con el objeto de obtener una T_{ref} más suave en comparación con los demás tipos de funciones de pertenencia. Para la definición de los valores frontera de las funciones de pertenencia, se tomaron como base los propuestos en [20], dado que estos se definieron teniendo en cuenta la experiencia proveída por más de 15 años de conocimiento en la operación del campo ACUREX.

Figura 26. Función de pertenencia de I_{corr}



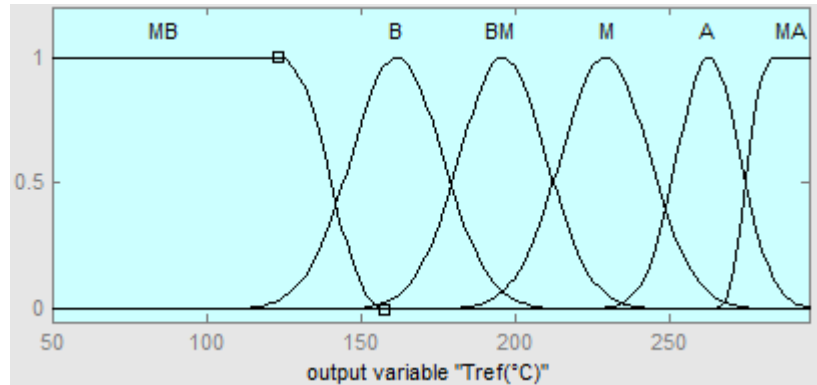
El dominio de la función de pertenencia de la radiación solar corregida comprende desde 0 hasta 1100 W/m^2 , y se clasifica en tres conjuntos difusos cuyas variables lingüísticas son: B (radiación solar baja), M (radiación solar media) y A (radiación solar alta). Según [20], establecer un mayor número de conjuntos difusos para la radiación solar, presenta comportamientos no deseados ante variaciones repentinas en la radiación (paso de nubes) debido a que este se hace más sensible a los cambios.

Figura 27. Función de pertenencia de T_{in}



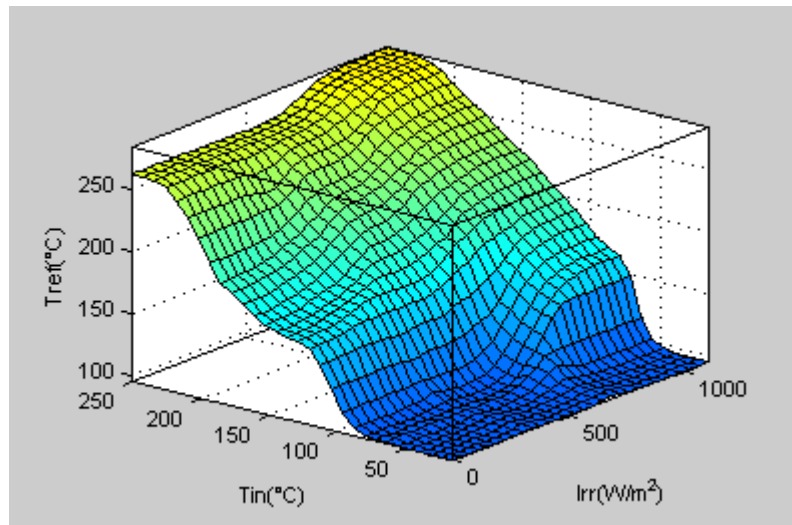
En la Figura 27 se exhibe la función de pertenencia de la temperatura de entrada del aceite, donde se cubren todas las condiciones usuales de operación. Este va desde los 15°C hasta los 250°C . Para ello, tienen en cuenta seis conjuntos difusos con las siguientes variables lingüísticas: MB (T_{in} muy baja), B (T_{in} baja), BM (T_{in} medio baja), M (T_{in} media), A (T_{in} alta), MA (T_{in} muy alta).

Figura 28. Función de pertenencia de T_{ref}



La distribución de la función de pertenencia de T_{ref} tiene en cuenta el máximo incremento de temperatura permitido ($\Delta T \leq 80 \text{ }^\circ\text{C}$). Se observa que el rango de operación de la temperatura de referencia es entre $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y $295 \text{ }^\circ\text{C}$, y seis conjuntos difusos representados con las mismas variables lingüísticas que T_{in} : MB (T_{ref} muy baja), B (T_{ref} baja), BM (T_{ref} medio baja), M (T_{ref} media), A (T_{ref} alta), MA (T_{ref} muy alta).

Figura 29. Superficie de T_{ref} generada por el FRG ante las entradas de I_{corr} y T_{in}



5.3.2. Relaciones difusas

En la siguiente tabla se presentan las 18 relaciones difusas definidas con base en los rangos de operación planteados anteriormente para todo el sistema.

Tabla 8. Relaciones difusas que describen la correspondencia entre variables de entradas y salida

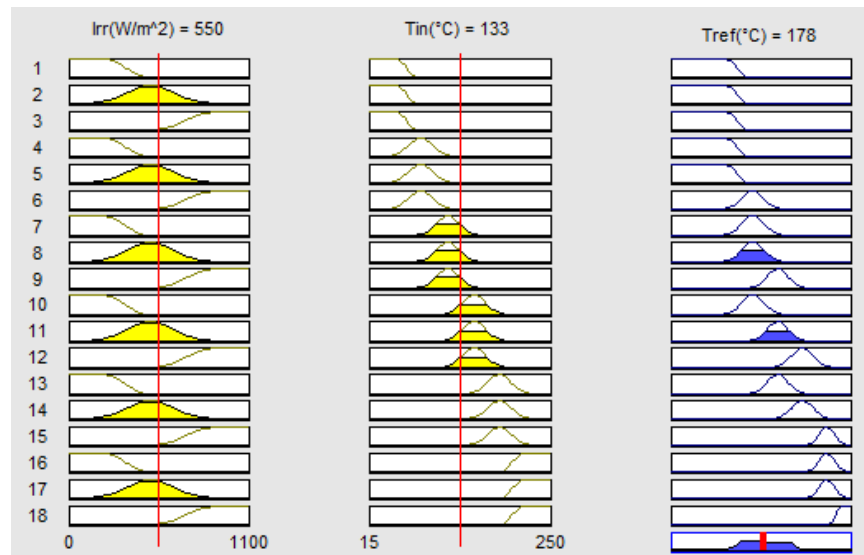
	MB	B	BM	M	A	MA
B	MB	MB	B	B	BM	A
M	MB	MB	B	BM	M	A
A	MB	B	BM	M	A	MA

Donde en la Tabla 8, la columna uno hace referencia a los conjuntos difusos de la radiación solar corregida I_{corr} , y la fila uno, a los de temperatura de entrada del fluido T_{in} .

5.3.3. Defusificación

Para el proceso de defusificación se usó el método de centro de gravedad (ver Anexo A). La Figura 30 muestra el proceso de defusificación para un punto de operación del sistema.

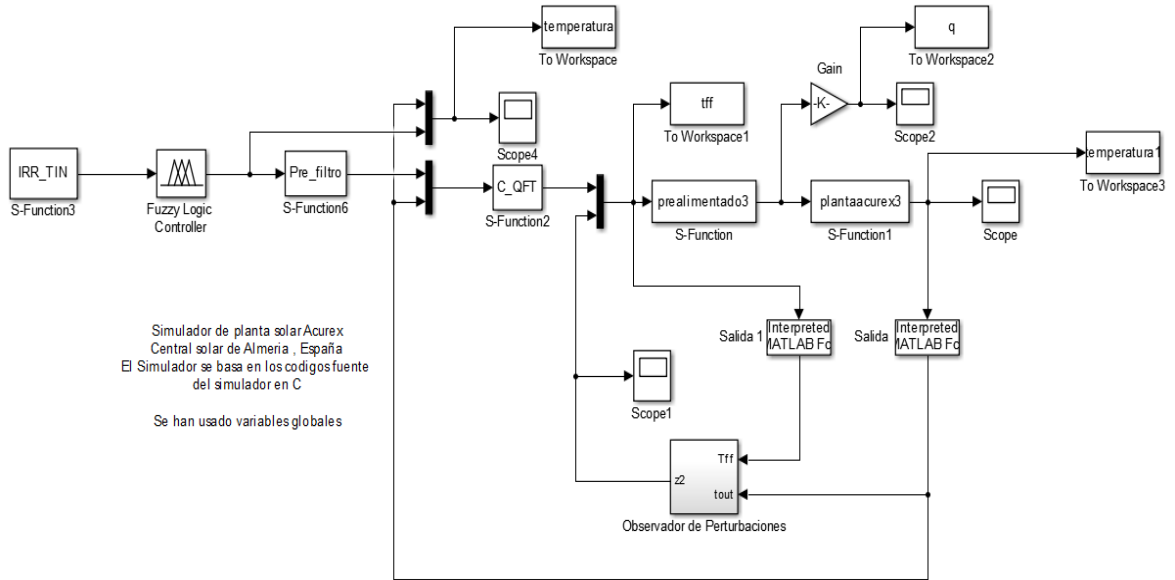
Figura 30. Defusificación para $I_{corr} = 550$ y $T_{in} = 133$



5.4. IMPLEMENTACIÓN DEL ESQUEMA DE CONTROL

El entorno del simulador del campo ACUREX se adaptó para implementar el esquema de control de la Figura 31, sustituyendo el controlador PI que este incluye de manera predeterminada (Figura 5), por el diseñado usando la técnica de control robusto QFT. Además, se agregó el observador lineal de perturbaciones y el gobernador de referencia. Asimismo, se mantuvo el uso del controlador *feedforward* descrito en [5], con el fin de disminuir el efecto de las perturbaciones sobre la respuesta en frecuencia de la planta.

Figura 31. Entorno del esquema de control en Simulink®



Debido a que la simulación se ejecuta de forma discreta (con un tiempo de muestreo de 39 [s]), se tuvo que transformar el esquema de control diseñado para su integración en el simulador, del dominio continuo al dominio discreto. Para la discretización de los modelos, se usó la transformación bilineal (también conocida con el nombre de Método de Tustin).

Las funciones de transferencia del controlador (5.6) y el prefiltro (5.7) descritas en el dominio discreto son:

$$G(z^{-1}) = \frac{0.6781 - 0.8268z^{-1} + 0.2407z^{-2}}{1 - 1.571z^{-1} + 0.5711z^{-2}} \quad (5.15)$$

$$F(z^{-1}) = \frac{0.1156 + 0.1156z^{-1}}{1 - 0.7689z^{-1}} \quad (5.16)$$

Las funciones de transferencia correspondientes al observador lineal de perturbaciones descritas en el dominio discreto son:

$$g_n(z^{-1}) = \frac{0.2167 - 0.2167z^{-1}}{1 - 0.5873z^{-1}} \quad (5.14)$$

$$Q(z^{-1}) = \frac{0.01913 + 0.01913z^{-1}}{1 - 0.9617z^{-1}} \cdot z^{-1} \quad (5.15)$$

La implementación del gobernador de referencia se hizo empleando el bloque *Fuzzy Logic Controller*, disponible en la librería "Fuzzy Logic Toolbox™" de Simulink®. Las variables de entrada al bloque del FRG (temperatura de entrada del aceite T_{in} , y radiación solar corregida I_{corr}), son leídas del fichero que contiene los datos del día de simulación.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se mencionó en el capítulo 2, el objetivo de control de un campo de colectores solares distribuidos es el de mantener la temperatura de salida del aceite del campo al valor más alto posible. Esto depende explícitamente de las condiciones ambientales presentadas el día de operación; haciendo que, si la radiación solar es relativamente baja, no se podrán alcanzar valores de temperatura altos (200-300°C) y por consecuencia, el valor de la temperatura de referencia tendrá que disminuir.

Este capítulo describe las pruebas realizadas en el simulador del campo de colectores solares distribuidos ACUREX, implementando el esquema de control propuesto en este proyecto, cuyo diseño fue presentado en el capítulo anterior. Para las simulaciones se usaron ficheros con datos reales (temperatura de referencia T_{ref} , radiación solar directa I , temperatura ambiente T_{amb} , temperatura de entrada del aceite T_{in}) de dos días diferentes de operación de la planta medidos en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España.

Primeramente, se muestran los resultados de simulación obtenidos para cada día, implementando el esquema de control robusto de dos grados de libertad diseñado (Figura 13) y, estos se comparan con los obtenidos mediante la adición del observador lineal de perturbaciones. Además, se exhiben los resultados de simulación arrojados con el esquema de control completo (Figura 31), reemplazando la temperatura de referencia dada por el operador, por aquella obtenida del gobernador de referencia. Por último, se hace un análisis comparativo entre los resultados de simulación usando el esquema de control con QFT y, los obtenidos mediante el controlador PI que trae por defecto el simulador.

6.1. SIMULACIÓN DÍA TIPO 1

El día tipo 1 corresponde a datos de operación medidos el 16 de septiembre de 1991 en la PSA. Los perfiles de radiación solar directa I , temperatura ambiente T_{amb} y temperatura de entrada del aceite T_{in} , se muestran en la Figura 32.

6.1.1.1. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB

6.1.1.1.1. Estabilidad y seguimiento de referencia

Como se puede ver en la Figura 34, el comportamiento de la temperatura de salida frente a los cambios en la referencia es bastante bueno, presentando error nulo en estado estacionario. Al final del día de operación se produce una sobreoscilación máxima de $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ante un cambio de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la señal de referencia. En la Figura 32 se puede observar que este correspondió a un día con pequeñas nubes, alcanzando niveles de radiación altos al medio día; debido a esto, el controlador pudo mantener un buen comportamiento pese a los cambios en la dinámica del proceso.

Figura 32. Datos día tipo 1 (16/09/1991)

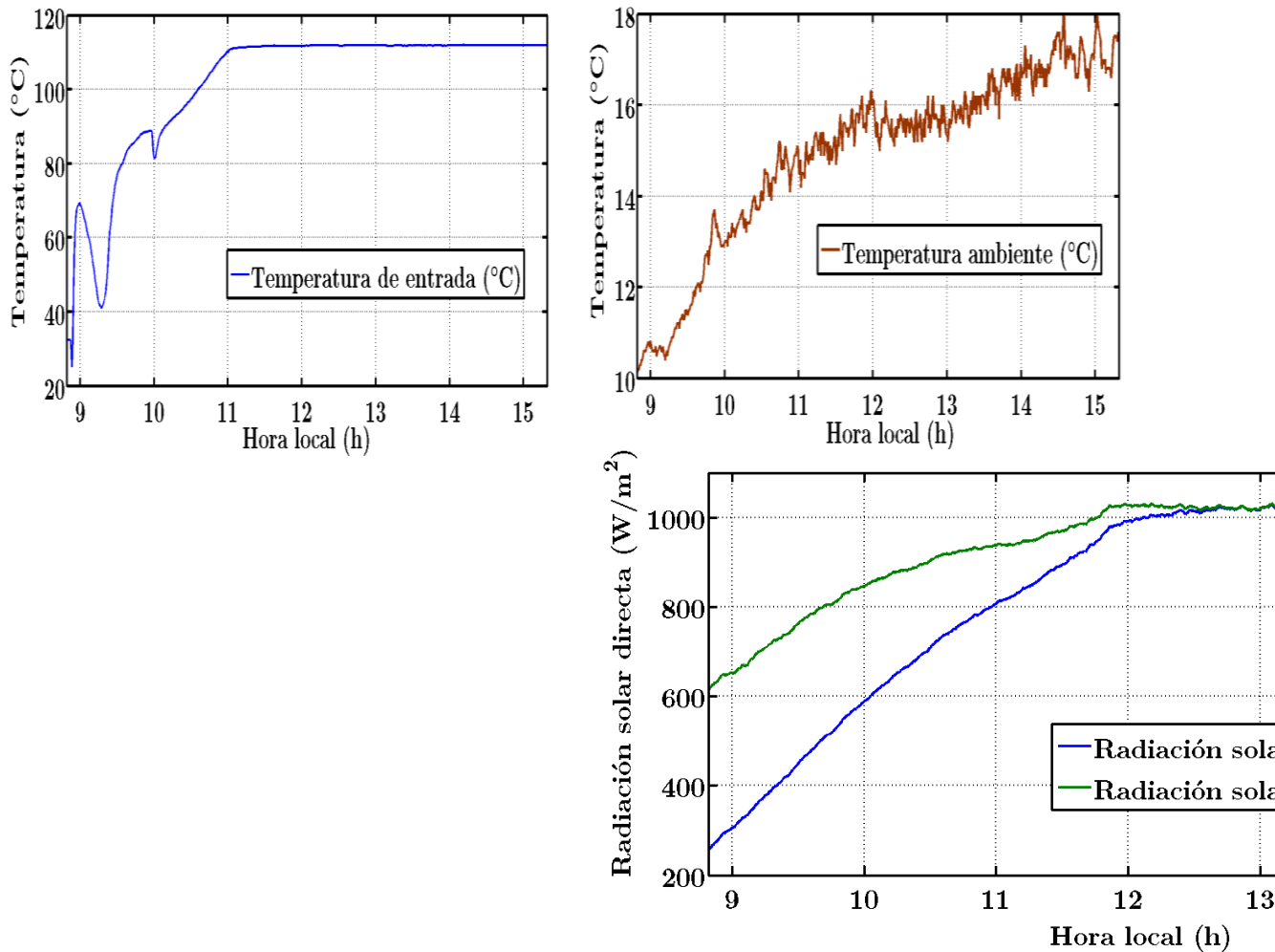


Figura 33. Flujo de aceite QFT-DOB (16/09/1991)

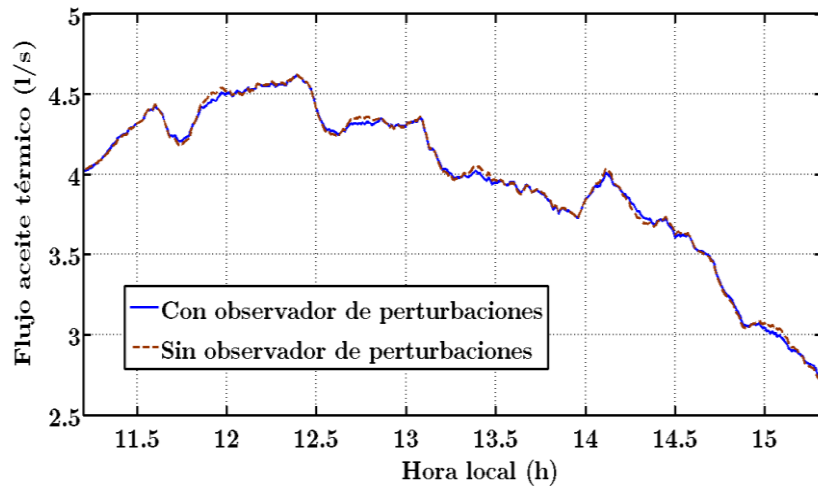


Figura 34. Simulación con el controlador QFT-DOB (16/09/1991)

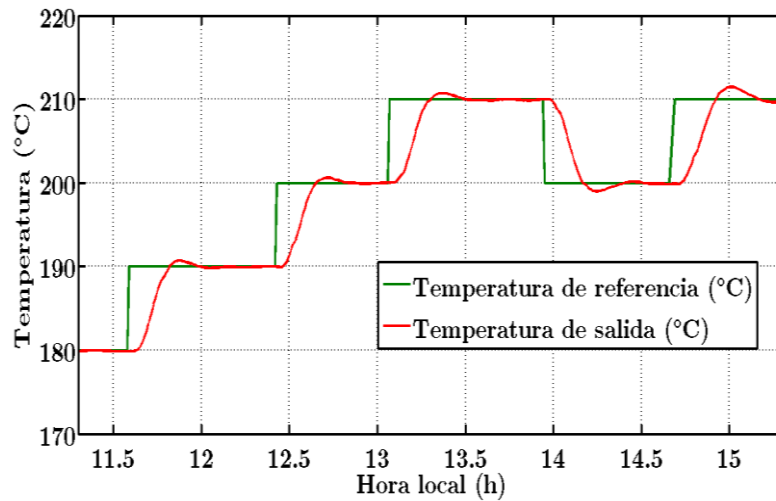
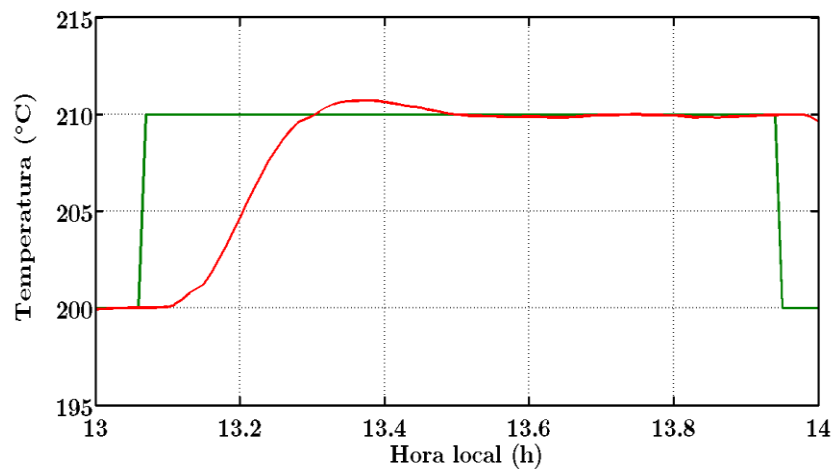


Figura 35. Zoom temperatura de salida controlador QFT-DOB (16/09/1991)



6.1.1.2. Esfuerzo de control

El flujo de aceite térmico demandado por la bomba para satisfacer dicha referencia, varía aproximadamente entre 2.5 l/s a 4.5 l/s, manteniéndose así, dentro de los límites máximo y mínimo alcanzable por la bomba durante todo el periodo de operación. Además, se puede ver que en este día los resultados obtenidos con DOB y sin DOB son muy similares (Figura 33), debido principalmente a que no se presentan cambios toscos en la radiación solar (paso de nubes) y, a que el perfil de temperatura de entrada se mantiene casi constante a partir de las 11:00 h (después de haber superado la fase de arranque).

6.1.2. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB-FRG

6.1.2.1. Estabilidad y seguimiento de referencia

La Figura 37 muestra la simulación del esquema de control completo QFT-DOB-FRG. El sistema se comporta de buena forma, presentando un seguimiento aceptable de la referencia. Nótese que la señal de referencia entregada por el FRG es bastante suave en comparación con la insertada manualmente por el operador de la planta, garantizando así, que no se presenten grandes sobreoscilaciones, brindando al sistema una buena estabilidad en la operación. Al final del día se pierdo un poco el seguimiento debido a la disminución gradual de la radiación solar.

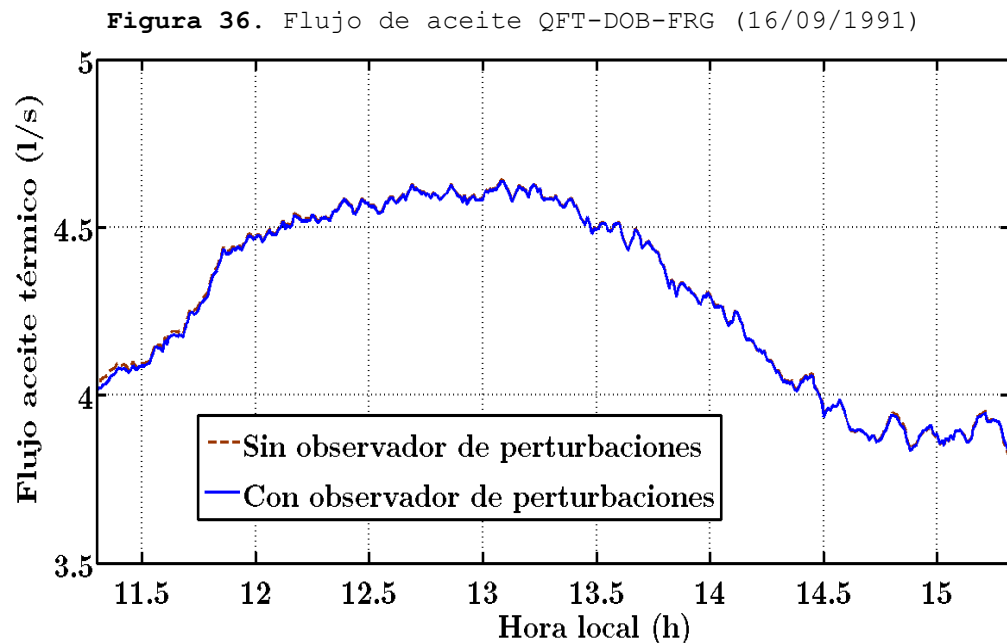
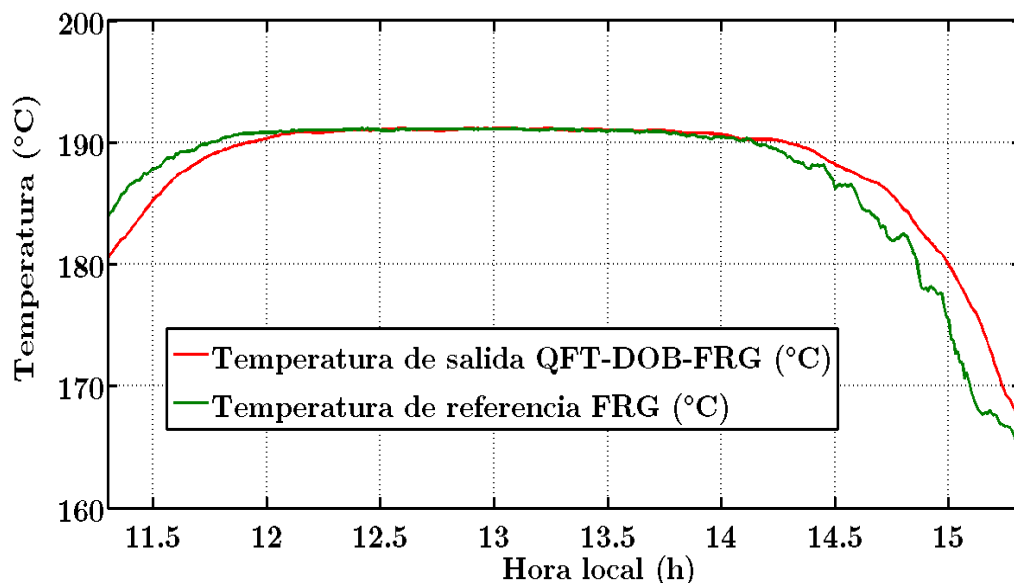


Figura 37. Simulación esquema de control QFT-DOB-FRG (16/09/1991)



6.1.2.2. Esfuerzo de control

La Figura 36 presenta los resultados obtenidos del flujo del aceite térmico para satisfacer la salida deseada. Se puede evidenciar que el flujo del aceite térmico varía entre 3.7 l/s y 4.6 l/s, manteniéndose muy estable durante la operación, de esta manera cumpliendo con las restricciones de caudal exigidas por la planta.

6.2. SIMULACIÓN DÍA TIPO 2

El día tipo 2 corresponde a datos de operación medidos el 27 de marzo de 1996 en la PSA. Los perfiles de radiación solar directa I , temperatura ambiente T_{amb} y temperatura de entrada del aceite T_{in} , se muestran en la Figura 38.

6.2.1. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB

6.2.1.1. Estabilidad y seguimiento de referencia

La Figura 39 muestra la evolución de la temperatura de salida a lo largo del día de simulación. Se puede observar que la temperatura de salida presenta un buen comportamiento ante la señal de referencia. En la fase de arranque, el seguimiento es un poco lento debido a los cambios rápidos de condiciones de operación ocasionados por los escalones de referencia. Como se indicó en el capítulo 3, la fase de arranque es la más complicada

para el control del proceso. En la operación de la planta real, se puede utilizar el mismo controlador básico pero modificando sus parámetros manualmente (es decir, si se tiene un PID, se definen parámetros más conservadores para evitar sobreoscilaciones debido al cambio más rápido de condiciones de operación) o bien un controlador adaptativo, con ajuste de parámetros automatizado².

Figura 38. Datos día tipo 2 (27/03/1996)

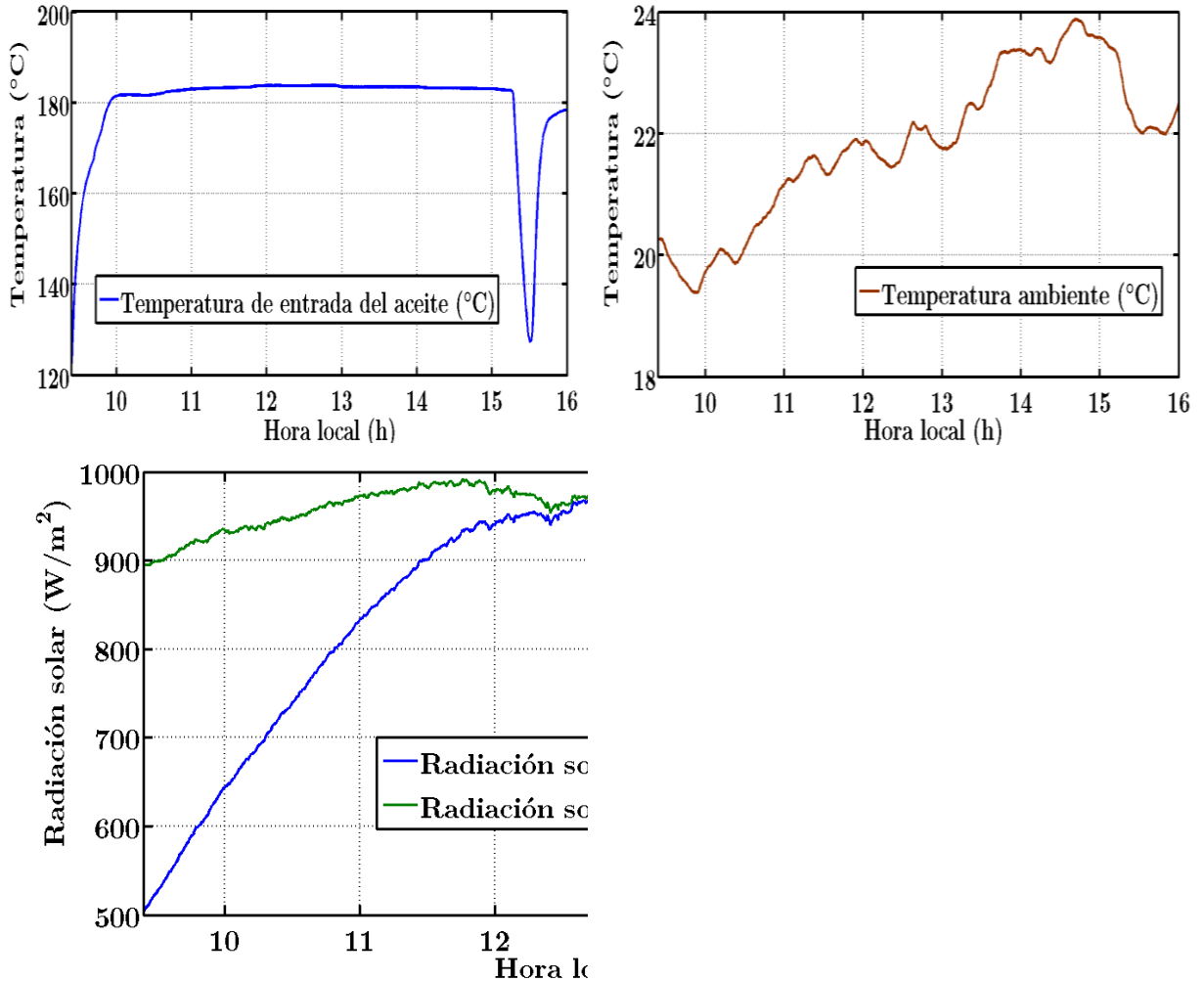


Figura 39. Simulación con el controlador QFT-DOB (27/03/1996)

² Cortesía: Dra. Loreto Valenzuela Gutiérrez. Científica titular OPI. Responsable del grupo de media concentración de la PSA (perteneciente a la Unidad de Sistemas Solares de Concentración).

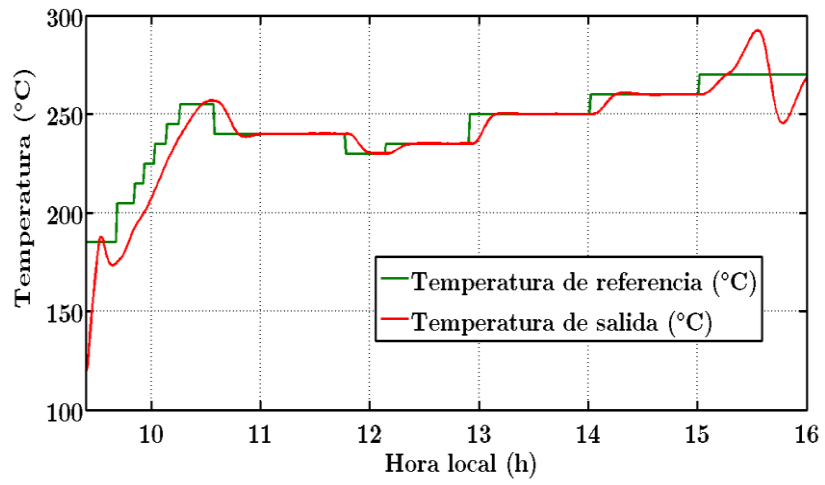


Figura 40. Zoom temperatura de salida controlador QFT-DOB (27/03/1996)

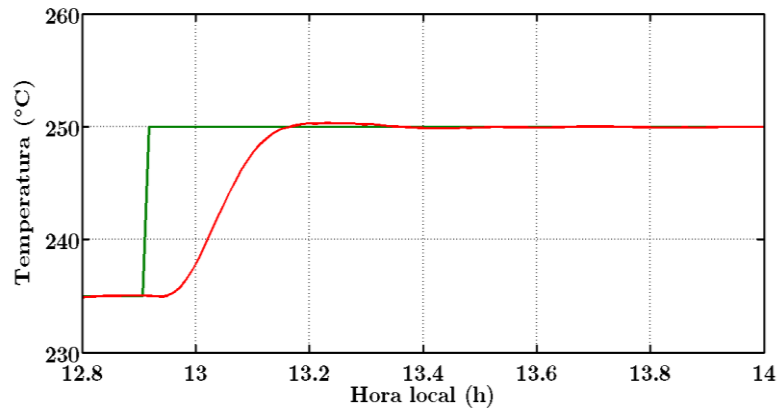
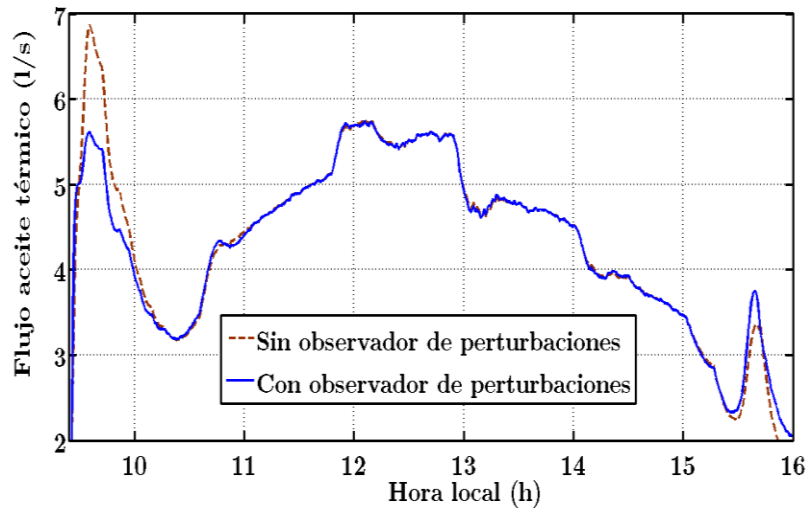


Figura 41. Flujo de aceite QFT-DOB (27/03/1996)



6.2.1.2. Esfuerzo de control

En la Figura 41 se visualiza el flujo de aceite (señal de control) durante el tiempo de simulación, contrastando los resultados obtenidos al usar DOB y, sin DOB. Durante la fase de arranque se puede ver que tanto la temperatura de entrada como la radiación solar, varían sustancialmente (Figura 38). Debido a esto, se presenta una diferencia en el flujo de aceite cuando se simula el esquema con DOB, haciendo que disminuya de 6.8 l/s a 5.5 l/s. Como se observa, después de las 15:00 h se presenta una disminución drástica en la temperatura de entrada (185°C a 130°C), apareciendo diferencia nuevamente entre los dos flujos.

6.2.2. ESQUEMA DE CONTROL QFT-DOB-FRG

6.2.2.1. Estabilidad y seguimiento de referencia

Los resultados de simulación obtenidos para este día son bastante buenos. Como muestra la Figura 42, desde la fase de arranque hasta las 15:00 h se presenta un buen seguimiento de referencia y estabilidad. Esto debido a que la señal de referencia arrojada por el FRG es bastante suave, otorgando una mayor estabilidad al sistema. Además, se puede ver que desde las 11:00 h hasta las 15:00 h no se presentan sobreoscilaciones.

Figura 42. Simulación esquema de control QFT-DOB-FRG (27/03/1996)

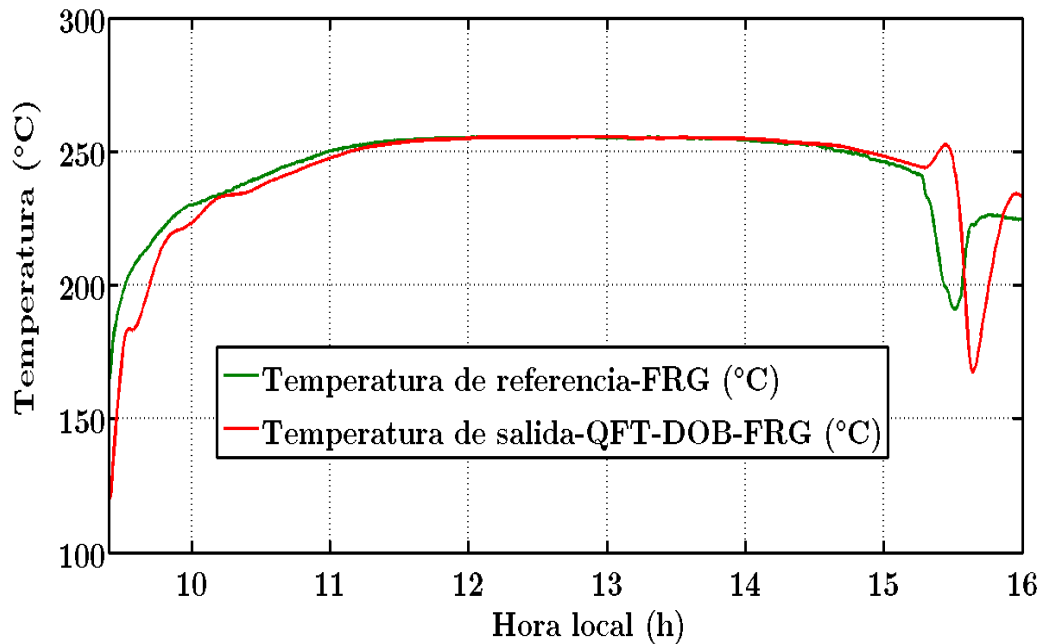
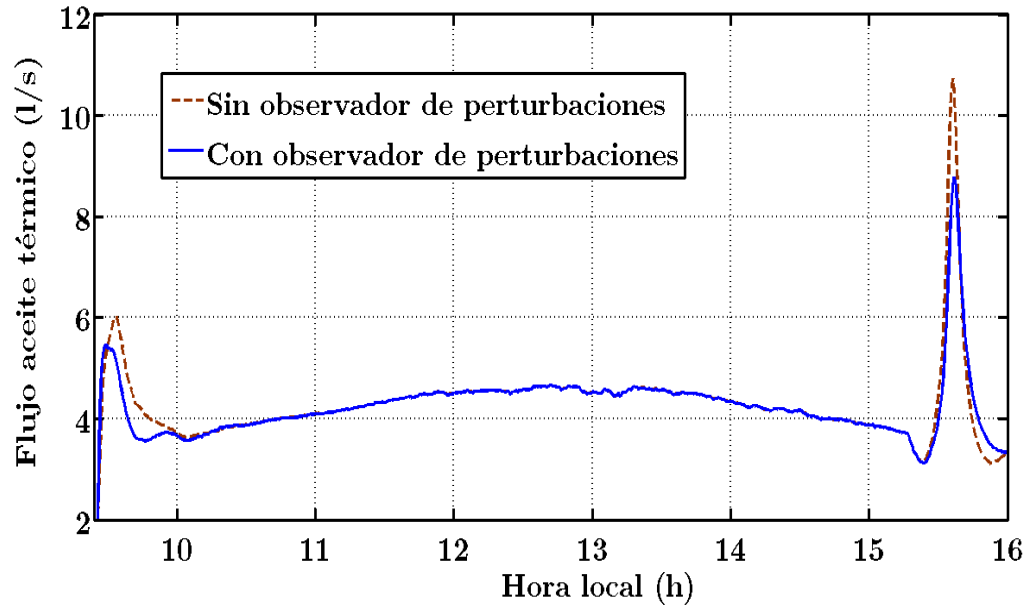


Figura 43. Flujo de aceite con y sin observador de perturbaciones (27/03/1996)



6.2.2.2. Esfuerzo de control

En este caso, se presenta la evolución del flujo de aceite a lo largo del día de simulación (Figura 43). Se puede evidenciar cómo el DOB reduce el flujo demandado a la bomba en las fases de arranque y finalización de la operación, disminuyendo el efecto de las perturbaciones sobre el sistema. En el arranque, se disminuye el esfuerzo de control de 6 l/s a 5.5 l/s, y, al final de la operación, no permite que este llegue a los 12 l/s (flujo máximo que puede suministrar la bomba), reduciéndolo a 8.7 l/s.

6.3. ESTUDIO COMPARATIVO

En esta sección se presenta un estudio comparativo entre el controlador PI que originalmente viene con el simulador y el controlador QFT diseñado en este trabajo de grado. Se ha utilizado el simulador para evaluar y comparar el comportamiento de dichos controladores bajo las mismas condiciones (temperatura de referencia, temperatura de entrada, radiación solar, reflectividad de los espejos) para los días tipo 1 y 2.

6.3.1. SIMULACIÓN DÍA TIPO 1

Figura 44. Simulación con el controlador PI y QFT (16/09/1991)

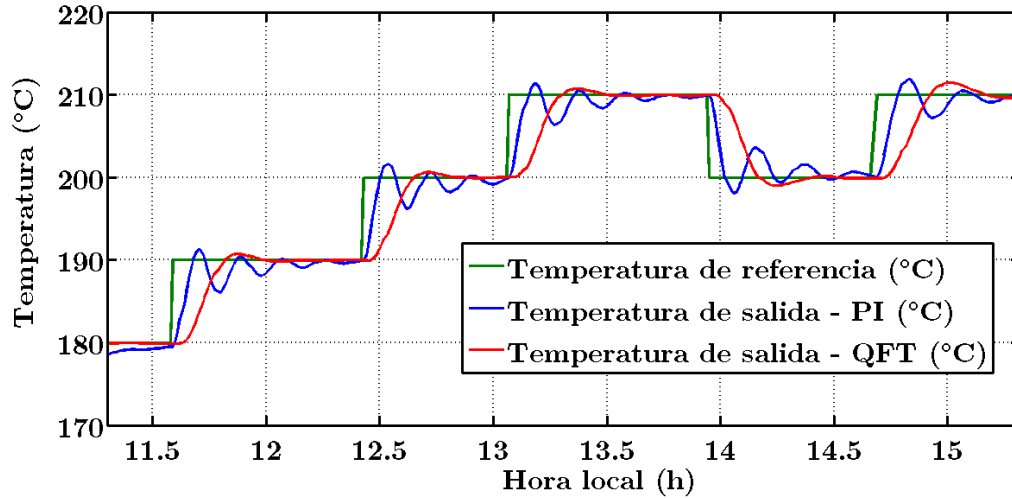
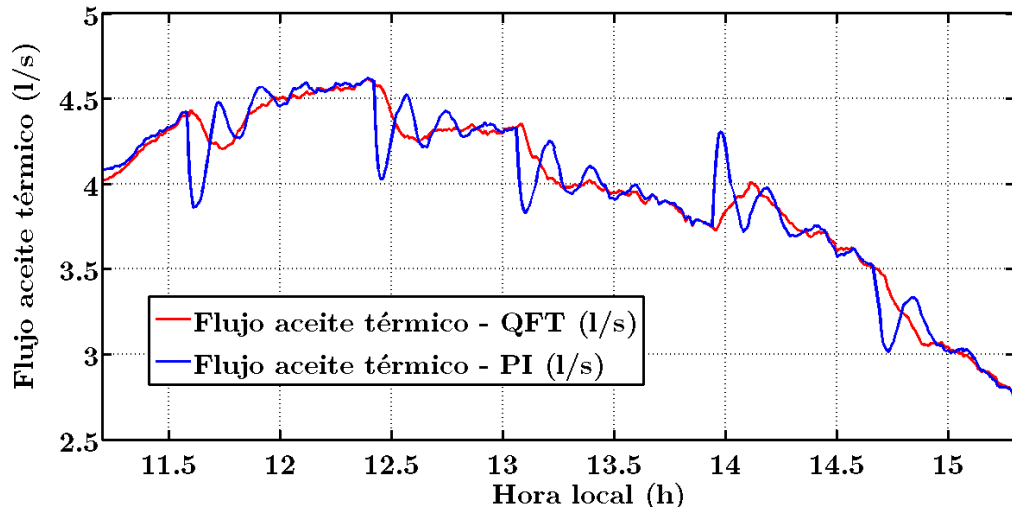


Figura 45. Flujo de aceite con el controlador PI y QFT (16/09/1991)



6.3.1.1. Estabilidad y seguimiento de referencia

La Figura 44 muestra el comportamiento de la temperatura de salida de los controladores PI y QFT ante cambios de 10 °C en los escalones de la temperatura de referencia dados por el operador de la planta. Se puede observar que el controlador PI presenta un tiempo de subida menor en comparación con el controlador QFT, pero

este, presenta muchas sobreoscilaciones haciendo que el tiempo de estabilización sea mucho mayor.

6.3.1.2. Esfuerzo de control

Como se observa en la Figura 45, ambos controladores cumplen con las restricciones de flujo de aceite máximo y mínimo entregado por la bomba, pero es evidente que el controlador PI presenta un esfuerzo más oscilatorio en comparación con el controlador robusto QFT.

6.3.2. SIMULACIÓN DÍA TIPO 2

6.3.2.1. Estabilidad y seguimiento de referencia

El comportamiento de la temperatura de salida para ambos controladores se muestra en la Figura 46. Para este día de simulación, se puede observar nuevamente que el controlador robusto presenta un mejor comportamiento ante los cambios de 10 a 15°C en la temperatura de referencia insertada manualmente por el operador. Al final del día el controlador PI presenta un valor de oscilación menor debido a su rapidez.

Figura 46. Simulación con el controlador PI y QFT (27/03/1996)

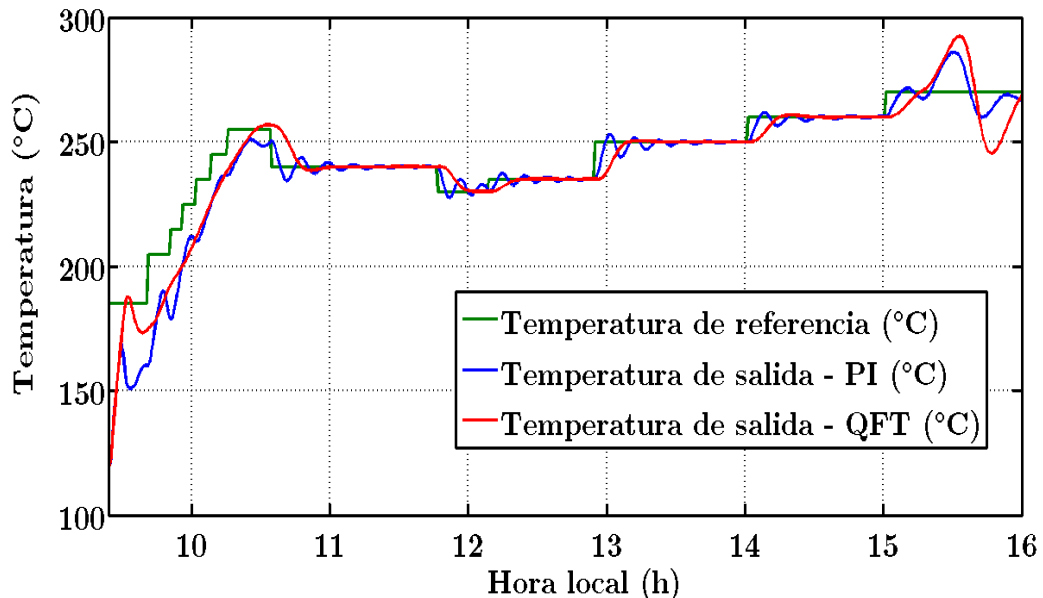
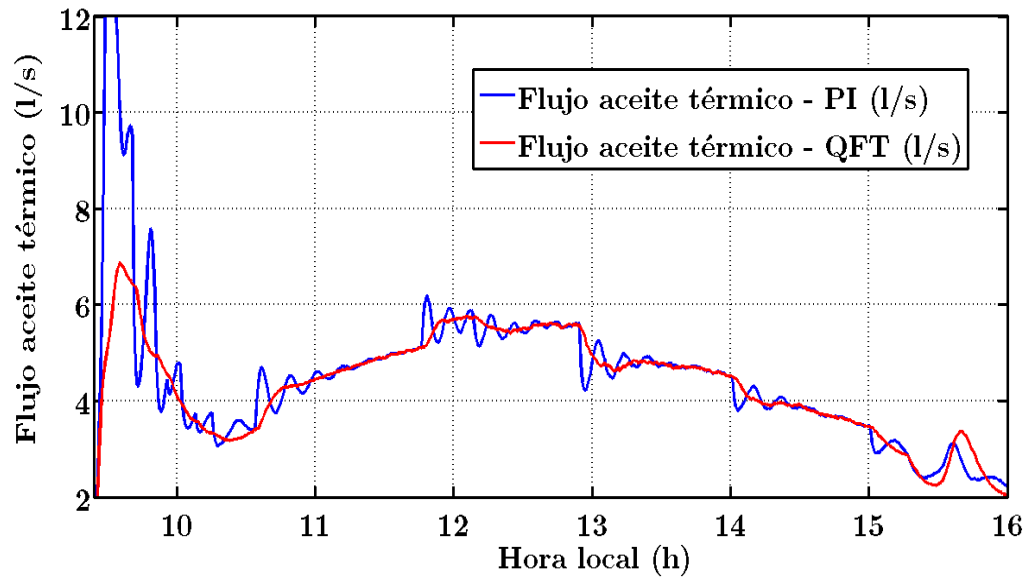


Figura 47. Flujo de aceite con el controlador PI y QFT (27/03/1996)



6.3.2.2. Esfuerzo de control

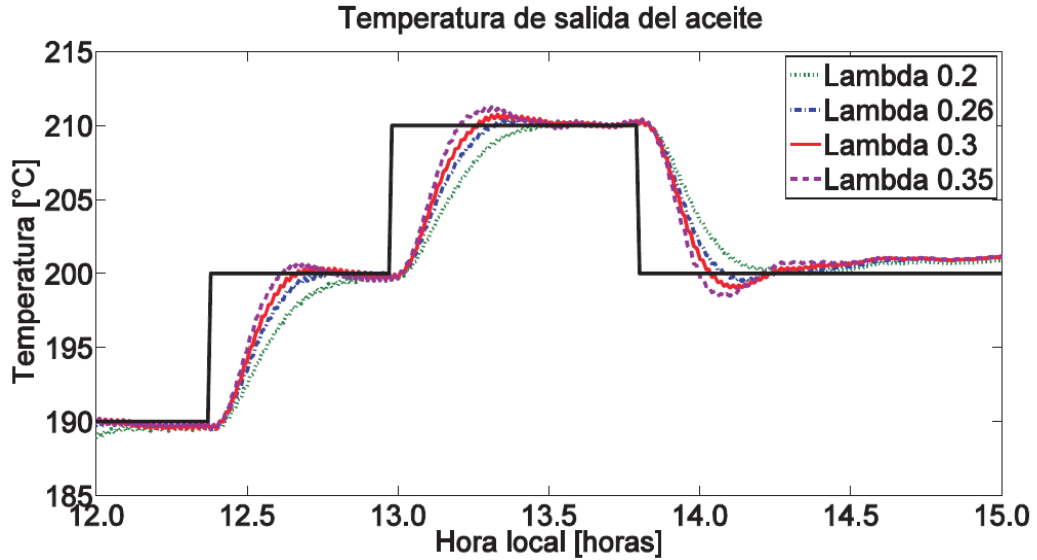
La Figura 47 muestra la variación del caudal de aceite requerido a la bomba por cada controlador. Al comienzo de la simulación, el controlador PI hace que la bomba se sature durante un periodo de unos 10 minutos, siendo este un comportamiento no deseable. El desempeño del controlador robusto en esta misma etapa es muy bueno, puesto a que no exige a la bomba altos niveles de flujo para alcanzar la temperatura requerida (valor máximo de 6.8 l/s).

Una vez analizados y comparados los resultados obtenidos de los dos días de simulación, se evidencia claramente que el controlador QFT propuesto en este trabajo de grado, presenta en términos generales, un mejor comportamiento ante los diferentes puntos de operación de la planta, en contraste con el controlador PI.

6.3.3. CONTRASTE CON UNA ESTRATEGIA DE CONTROL EXPUESTA EN LA LITERATURA

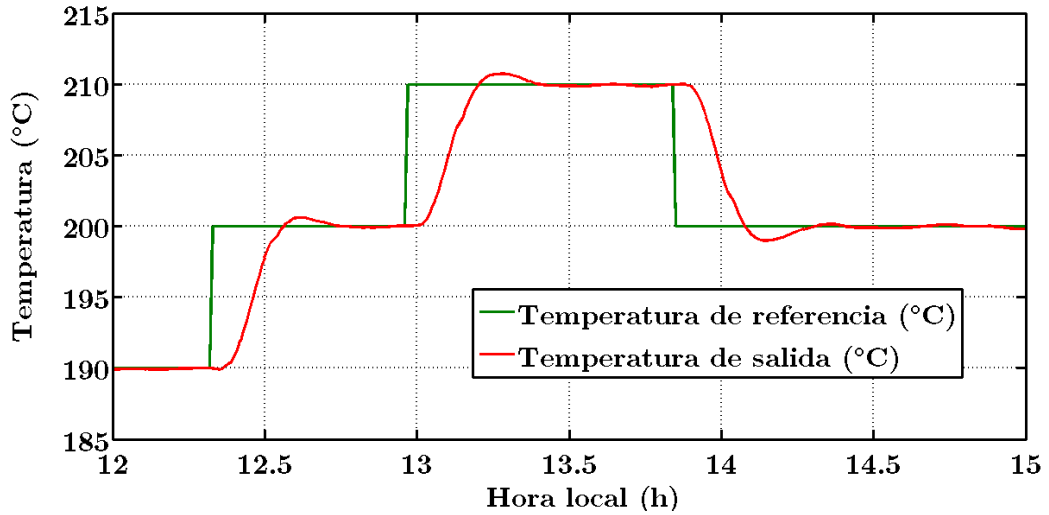
A continuación, se presenta la comparación de resultados de simulación obtenidos bajo las condiciones de operación del día tipo 1 (16/09/1991), entre la estrategia de control MPC modelo ARX realizada por doctores de la Universidad de Chile [43] y, la estructura de control robusto QFT propuesta en este trabajo de grado.

Figura 48. Temperatura de salida esquema MPC modelo ARX día tipo 1



Fuente: PONCE, Carolina; SÁEZ, Doris; NÚÑEZ, Alfredo. Fuzzy Predictive Control Strategy for a Distributed Solar Collector Plant. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol. 12, no 4, p. 626-633.

Figura 49. Temperatura de salida controlador QFT día tipo 1



En las figuras superiores se logra evidenciar que el controlador QFT presenta un tiempo de establecimiento un poco menor en comparación con el controlador MPC-ARX ante cualquier variación de lambda (Figura 48). Además, se percibe que el controlador MPC-ARX presenta un pequeño error en estado estacionario a partir de las 14.5 h, mientras que el controlador QFT (Figura 49) presenta un buen comportamiento para estos puntos de operación.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se diseñó un esquema de control robusto para el campo de colectores solares distribuidos ACUREX, con el objetivo de controlar la temperatura de salida del aceite pese a las perturbaciones que afectan el sistema y, a la incertidumbre asociada al modelo de parámetros distribuidos usado para representar la dinámica de este. Para empezar, se obtuvo un conjunto de sistemas lineales que modelasen la dinámica de la planta en forma de un sistema de primer orden con incertidumbre paramétrica más un retardo (*dead time*). Posteriormente, se diseñó una estructura de control robusto de dos grados de libertad (prefiltro y controlador de parámetros fijos) mediante la técnica de realimentación cuantitativa QFT, cumpliendo con ciertas especificaciones de estabilidad y seguimiento de referencia. Luego, se diseñó un observador de perturbaciones a partir del modelo lineal de la planta para disminuir el esfuerzo de control y satisfacer el problema de saturación del flujo de aceite. Por último, se aplicó la teoría de lógica difusa con el objetivo de adaptar un gobernador de referencia. De acuerdo a los resultados obtenidos en el simulador del campo se logran obtener las siguientes conclusiones:

- El controlador robusto diseñado mediante la técnica QFT, exhibe un buen desempeño ante las diferentes condiciones de operación que pudieron ser simuladas, ajustándose a los objetivos de control (estabilidad y seguimiento de referencia) teniendo en cuenta la incertidumbre asociada al modelo de primer orden utilizado para representar la dinámica de la planta en la etapa de diseño.
- El modelo lineal con incertidumbre en los parámetros diseñado para representar la dinámica del campo ACUREX, demuestra ser competente con el comportamiento no lineal que presenta el modelo de la planta real.
- Los resultados de simulación obtenidos reflejan el buen desempeño del observador de perturbaciones, cumpliendo con el objetivo de reducir el esfuerzo de control (flujo de aceite requerido a la bomba) ante grandes perturbaciones en la radiación solar directa (paso de nubes) y en la temperatura de entrada del aceite, dándole más robustez al esquema de control.
- El gobernador de referencia adaptado aplicando la teoría de lógica difusa, muestra un gran desempeño durante todas las condiciones de operación simuladas. Además, asegura que se cumplan las condiciones impuestas por seguridad en la planta,

evitando en todo momento que ocurra la saturación de la bomba, incluso en el arranque o en grandes pasos de nubes. Debido a esto, se puede afirmar que es posible controlar la planta de forma completamente automatizada por el FRG, logrando una referencia óptima en todo el rango de operación de acuerdo a las variables que más afectan el comportamiento del sistema (radiación solar y temperatura de entrada del aceite); lo cual no es posible lograr manipulando manualmente la referencia, principalmente debido al comportamiento estocástico de las variables externas. Esto conlleva a que menos supervisión por parte del operador sea requerida para el funcionamiento de la planta.

- El empleo del simulador del campo ACUREX facilita el desarrollo, comparación y análisis de diferentes técnicas de control que puedan ser aplicadas a dicha planta, debido a la dificultad de obtener un espacio en la planta real para realizar pruebas; por lo tanto, es una herramienta de gran utilidad académica.
- Al comparar los resultados de simulación obtenidos usando el esquema de control robusto QFT diseñado, con estrategias de control presentadas en la literatura (algunas de ellas implementadas en la planta real), se puede afirmar que este presentaría un buen desempeño bajo las distintas condiciones de operación que se puedan presentar en la planta real.

GLOSARIO

Capacidad calorífica: En un sentido general, se refiere a la capacidad de un material para almacenar calor.

Caudal: Velocidad a la cual un líquido viaja, por lo general a través de una abertura o conducto.

Colector: Dispositivo que absorbe radiación solar y la convierte en energía térmica.

Combustible fósil: Petróleo, carbón y combustibles derivados del gas natural.

Modos de resonancia: Frecuencias en las que la magnitud de la respuesta de frecuencia tiene un valor máximo o mínimo.

Pérdidas térmicas: Una disminución en la cantidad de calor contenida en un espacio, que resulta de flujo de calor a través de paredes, ventanas, techos, y otros componentes de revestimiento constructivos.

Radiación directa: Radiación solar que proviene directamente desde el sol.

Sobreoscilación: Máxima desviación respecto a la referencia tras un cambio en la misma.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDERSSON, Mats. The DCS Thermal Stratification Tank. En *The IEA/SSPS Solar Thermal Power Plants—Facts and Figures—Final Report of the International Test and Evaluation Team (ITET)*. Springer Berlin Heidelberg, 1986, vol. 4, p. 98.
- [2] ANDRADE, G. A., et al. A practical NMPC with robustness of stability applied to distributed solar power plants. *Solar Energy*, 2013, vol. 92, p. 106-122.
- [3] BERENGUEL, Manuel. *Contribuciones al control de colectores solares distribuidos*. 1995. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- [4] BERENGUEL, Manuel; CAMACHO, Eduardo F.; RUBIO, Francisco R. Gain scheduling generalized predictive controller applied to the control of a parabolic trough solar collectors field. *Proceedings of the 8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, 1996, vol. 2, p. 685-703.
- [5] BERENGUEL, Manuel; CAMACHO, Eduardo F.; RUBIO, Francisco R. Simulation software package for the Acurex field. *ESI of Seville, Spain, Internal Rep*, 1993.
- [6] BORGHESANI, Craig; CHAIT, Yossi; YANIV, Oded. The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox. Version 3. Terasoft, 2003.
- [7] BOSE, Bimal K. Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2010, vol. 4, no 1, p. 6-17.
- [8] CAMACHO, Eduardo F., et al. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part I: Modeling and basic control approaches. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, no 10, p. 1240-1251.
- [9] CAMACHO, Eduardo F., et al. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part II: Advanced control approaches. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, no 10, p. 1252-1272.
- [10] CAMACHO, Eduardo F., et al. *Control of Solar Energy Systems*. Springer-Verlag London, 2012.
- [11] CAMACHO, Eduardo F.; BERENGUEL, Manuel. Application of generalized predictive control to a solar power plant. En *Control Applications, 1994., Proceedings of the Third IEEE Conference on*. IEEE, 1994. p. 1657-1662.
- [12] CAMACHO, Eduardo F.; BERENGUEL, Manuel. Robust adaptive model predictive control of a solar plant with bounded uncertainties. *International journal of adaptive control and signal processing*, 1997, vol. 11, no 4, p. 311-325.
- [13] CAMACHO, Eduardo F.; BERENGUEL, Manuel; RUBIO, Francisco R. *Advanced control of solar plants*. Springer-Verlag London, 1997.

- [14] CAMACHO, Eduardo F.; RUBIO, Francisco R.; GUTIERREZ, J. A. Modelling and simulation of a solar power plant with a distributed collector system. En *IFAC Symp. on Power Systems Modelling and Control Applications, Brussels*. 1988.
- [15] CARDOSO, A. L.; HENRIQUES, Jorge; DOURADO, António. Fuzzy supervisor and feedforward control of a solar power plant using accessible disturbances. En *Control Conference (ECC), 1999 European*. IEEE, 1999. p. 1711-1716.
- [16] CARMONA, Ricardo, et al. *Regulation and automation of the SSPS-DCS ACUREX field of the PSA*. Reporte No. R-15/87, PSA. 1987.
- [17] CARMONA, Ricardo. *Análisis, modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento en un eje*. 1986. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- [18] CHAIT, Yossi; YANIV, Oded. Multi-input/single-output computer-aided control design using the quantitative feedback theory. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1993, vol. 3, no 1, p. 47-54.
- [19] CIRRE, Cristina M., et al. Control de plantas solares con generación automática de consignas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2004, vol. 1, no 1, p. 50-56.
- [20] CIRRE, Cristina M., et al. Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field. *European Journal of Operational Research*, 2009, vol. 193, no 3, p. 709-717.
- [21] CIRRE, Cristina M., et al. Robust control of solar plants with distributed collectors. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, vol. 43, no 5, p. 823-828.
- [22] DE LA PARTE, Mercedes P., et al. Application of predictive sliding mode controllers to a solar plant. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, vol. 16, no 4, p. 819-825.
- [23] DRIANKOV, Dimiter; HELLENDORF, Hans; REINFRANK, Michael. *An introduction to fuzzy control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] EASTMAN. (s.f.). THERMINOL. Recuperado el 28 de 07 de 2016, de <https://www.therminol.com/products/Therminol-55>
- [25] ESPINOSA, Jairo; VANDEWALLE, Joos y WERTZ, Vincent. *Fuzzy logic, identification and predictive control*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [26] GARCÍA-SANZ, Mario. *Control Robusto QFT Teoría y Aplicaciones (Quantitative Feedback Theory)*. Pamplona, España. Universidad Pública de Navarra. 2003.
- [27] GARCÍA-SANZ, Mario. Control robusto cuantitativo QFT: historia de una idea. *RIAI*, 2005, vol. 2, no 3, p. 25-38.
- [28] GARCÍA-SANZ, Mario. The QFT control toolbox (QFTCT) for MATLAB. *CWRU, UPNA y ESA-ESTEC*. 2016. Obtenido de <http://cesc.case.edu>

- [29] GARCÍA-SANZ, Mario; HOUPIS, Constantine H. *Wind energy systems: control engineering design*. CRC press, 2012.
- [30] GERA, Amos; HOROWITZ, Isaac. Optimization of the loop transfer function†. *International Journal of Control*, 1980, vol. 31, no 2, p. 389-398.
- [31] HOROWITZ, Isaac. Invited paper Survey of quantitative feedback theory (QFT). *International Journal of Control*, 1991, vol. 53, no 2, p. 255-291.
- [32] HOUPIS, Constantine H.; RASMUSSEN, Steven J.; GARCIA-SANZ, Mario. *Quantitative feedback theory: fundamentals and applications*. CRC Press, 2005.
- [33] JAYASURIYA, Suhada. Frequency domain design for robust performance under parametric, unstructured, or mixed uncertainties. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 1993, vol. 115, no 2B, p. 439-451.
- [34] KOVACIC, Zdenko; BOGDAN, Stjepan. *Fuzzy controller design: theory and applications*. CRC press, 2005.
- [35] LEMOS, J. M.; RATO, L. M.; MOSCA, E. Integrating predictive and switching control: Basic concepts and an experimental case study. En *Nonlinear Model Predictive Control*. Birkhäuser Basel, 2000. p. 181-190.
- [36] LEMOS, João M.; NEVES-SILVA, Rui; IGREJA, José M. *Adaptive control of solar energy collector systems*. Springer, 2014.
- [37] LI, Shihua, et al. *Disturbance observer-based control: methods and applications*. CRC press, 2014.
- [38] MARTÍNEZ, Montserrat Gil. *Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones e incertidumbre*. 2001. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.
- [39] MEABURN, A.; HUGHES, F. M. A simple predictive controller for use on large scale arrays of parabolic trough collectors. *Solar energy*, 1996, vol. 56, no 6, p. 583-595.
- [40] NORDGRES, R. E., et al. New formulations for quantitative feedback theory. En *American Control Conference, 1993*. IEEE, 1993. p. 1716-1720.
- [41] NORMEY-RICO, Julio E. *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [42] ORBACH, Abraham; RORRES, Chris; FISCHL, Robert. Optimal control of a solar collector loop using a distributed-lumped model. *Automatica*, 1981, vol. 17, no 3, p. 535-539.
- [43] PONCE, Carolina; SÁEZ, Doris; NÚÑEZ, Alfredo. Fuzzy Predictive Control Strategy for a Distributed Solar Collector Plant. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol. 12, no 4, p. 626-633.
- [44] RATO, Luis, et al. Multirate MUSMAR cascade control of a distributed solar field. 1997.
- [45] RUBIO, Francisco R. *Control adaptativo de procesos industriales: aplicación a una central solar*. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 1985.

- [46] RUBIO, Francisco R.; BERENGUEL, Manuel; CAMACHO, Eduardo F. Fuzzy logic control of a solar power plant. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 1995, vol. 3, no 4, p. 459-468.
- [47] RUBIO, Francisco R.; CAMACHO, Eduardo F.; BERENGUEL, Manuel. Control de campos de colectores solares. *RIAI*, 2006, vol. 3, no 4, p. 26-45.
- [48] SILVA, R. N., et al. Cascade control of a distributed collector solar field. *Journal of Process Control*, 1997, vol. 7, no 2, p. 111-117.
- [49] SIRA-RAMÍREZ, H., et al. Ultramodelos Globales y el Control por Rechazo Activo de Perturbaciones en Sistemas No lineales Diferencialmente Planos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 2015, vol. 12, no 2, p. 133-144.
- [50] VALENZUELA, L.; BALSÁ, P. Series and parallel feedforward control schemes to regulate the operation of a solar collector field. En *Proceedings of the 2nd User Workshop Training and Mobility of Researchers Programme at Plataforma Solar de Almería, November 10-11*. 1998. p. 19-24.
- [51] VALENZUELA, Loreto, et al. Direct steam generation in solar boilers. *IEEE control systems*, 2004, vol. 24, no 2, p. 15-29.
- [52] ZADEH, Lotfi A. Fuzzy sets. *Information and control*, 1965, vol. 8, no 3, p. 338-353.
- [53] ZADEH, Lotfi A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 1973, no 1, p. 28-44.

ANEXOS

ANEXO A. LÓGICA DIFUSA

A.1. INTRODUCCIÓN

La palabra "difuso" (*fuzzy*) es usada para describir términos que no son del todo conocidos o suficientemente claros, o en los cuales sus especificaciones dependen de la subjetividad, estimación o intuición de la persona que está describiendo los términos [34]. La teoría de conjuntos difusos fue introducida por Lofti Zadeh en 1965 [52].

Procesos donde se presentan fuertes dinámicas no lineales y están expuestos a grandes perturbaciones externas, presentan un alto grado de dificultad para su control y, por lo general, son controlados por operadores que utilizan sus bastos años de experiencia y conocimiento acerca de las características dinámicas y estáticas del sistema [34]. La lógica difusa, suministra un mecanismo de inferencia que permite imitar el razonamiento humano en sistemas basados en la experiencia. Además, es una lógica multivaluada que permite representar de una forma matemática la incertidumbre y la vaguedad, suministrando herramientas precisas para su tratamiento.

A continuación, se presenta la formulación general de la lógica difusa [25], a partir de la cual se diseñará el gobernador de referencia para la estrategia de control propuesta.

A.2. CONJUNTOS DIFUSOS

Sea X el conjunto universal. Un conjunto convencional (*crisp*) A está definido por una función característica (pertenencia) $\mu(x)(x \in X)$ que asigna los valores 1 o 0 a cada elemento $x \in X$, respectivamente, si x pertenece o no pertenece a A . $\mu_A : X \rightarrow \{0,1\}$

Un conjunto difuso A está definido por una *función de pertenencia* (*membership*) $\mu_A : X \rightarrow \{0,1\}$ que describe el grado de pertenencia de los elementos de A . Valores de $\mu_A(x)$ cercanos a 1 denotan un alto grado de pertenencia al conjunto.

A.2.1. Algunos ejemplos de funciones de pertenencia

Sea $X = \mathfrak{R}$. Para la declaración "x esta en torno a M" podemos definir las siguientes funciones de pertenencia:

Delta

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x = M \\ 0, & \text{para el resto} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Escalón

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & M - M_1 \leq x \leq M + M_1 \\ 0, & \text{para el resto} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Rampa o triangular

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x < M - M_1 \text{ o } x > M + M_1 \\ 1 + \frac{x - M}{M_1} & M - M_1 \leq x \leq M \\ 1 - \frac{x - M}{M_1} & M \leq x \leq M + M_1 \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Exponencial

$$\mu(x) = \exp(-t|x - M|) \quad (\text{A.4})$$

Gaussiana

$$\mu(x) = \exp(-t(x - M)^2) \quad (\text{A.5})$$

A.3. OPERACIONES DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

A.3.1. A está contenido en B

Un conjunto A está contenido en el conjunto B, o A es un subconjunto de B, denotado por $A \subseteq B$ si,

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.6})$$

Un subconjunto es propio ($A \subset B$) si $(\mu_A(x) < \mu_B(x))$.

A.3.2. Complemento, negación

La función de pertinencia $\mu_{\bar{A}}(x)$ del complemento de A (denotado por \bar{A}) está definida por,

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.7})$$

El complemento relativo del conjunto A con respecto a un conjunto B está definido por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \mu_B(x) - \mu_A(x), \quad x \in X \text{ si } \mu_B(x) > \mu_A(x) \quad (\text{A.8})$$

A.3.3. Intersección

La intersección de un conjunto A con un conjunto B está definida por:

$$A \cap B = \{x | x \in A \wedge x \in B\} \quad (\text{A.9})$$

Los operadores más importantes para la intersección son:

- Operador extremo

$$\mu_{A \cap_1 B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in X \quad (\text{A.10})$$

- Operador producto

$$\mu_{A \cap_2 B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.11})$$

Para conjuntos clásicos (*crisp*):

$$\mu_{A \cap_1 B}(x) = \mu_{A \cap_2 B}(x) \quad (\text{A.12})$$

Para conjuntos difusos:

$$\mu_{A \cap_1 B}(x) \geq \mu_{A \cap_2 B}(x) \quad (\text{A.13})$$

Características de los operadores intersección:

- \cap_1 y \cap_2 son conmutativos.
- \cap_1 y \cap_2 son asociativos.
- Identidad: $\mu_A \cap_i 1 = \mu_A$.
- Absorción: $\mu_A \cap_i 0 = 0$.
- \cap_1 es un operador idempotente. $\mu \cap_1 \mu = \mu$.
- \cap_2 no es un operador idempotente. $\mu \cap_2 \mu \neq \mu$, $\mu \cap_2 \mu \subset \mu$.
- Para conjuntos difusos la ley de no contradicción ($\mu \cap \bar{\mu} = 0$) no se mantiene.
- La intersección del producto es un subconjunto de la intersección mínima: $(\mu_A \cap_1 \mu_B) \subset (\mu_A \cap_2 \mu_B)$.
- Para $\mu_A \subset \mu_B$, $\mu_A \cap_1 \mu_B = \mu_A$ y $\mu_A \cap_2 \mu_B \subset \mu_A$.

A.3.4. Unión

La unión de un conjunto A con un conjunto B está definida por:

$$A \cup B = \{x | x \in A \vee x \in B\} \quad (\text{A.14})$$

Los operadores más importantes para la unión son:

- Operador extremo

$$\mu_{A \cup_1 B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \text{máx}\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad \forall x \in X \quad (\text{A.15})$$

- Operador suma

$$\mu_{A \cup_2 B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x), \quad \forall x \in X \quad (\text{A.16})$$

Para conjuntos clásicos (*crisp*):

$$\mu_{A \cup_1 B}(x) = \mu_{A \cup_2 B}(x) \quad (\text{A.17})$$

Para conjuntos difusos:

$$\mu_{A \cup_1 B}(x) \leq \mu_{A \cup_2 B}(x) \quad (\text{A.18})$$

Características de los operadores unión:

- U_1 y U_2 son conmutativos.
- U_1 y U_2 son asociativos.
- Identidad: $\mu_A U_i 0 = 0$.
- Absorción: $\mu_A U_i 1 = \mu_A$.
- U_1 es un operador idempotente. $\mu U_1 \mu = \mu$.
- U_2 no es un operador idempotente. $\mu U_2 \mu \neq \mu$, $\mu U_2 \mu \subset \mu$.
- Para conjuntos difusos la ley del medio excluido ($\mu U \bar{\mu} = X$) no se mantiene.
- $(\mu_A U_1 \mu_B) \subset (\mu_A U_2 \mu_B)$.
- Para $\mu_A \subset \mu_B$, $\mu_A U_1 \mu_B = \mu_B$ y $\mu_A U_2 \mu_B \supset \mu_B$.

A.4. RELACIONES DIFUSAS

Una relación representa la presencia o ausencia de asociación, interacción o interconexión entre los elementos de dos o más conjuntos. Una relación binaria es cualquier relación entre dos conjuntos. Por ejemplo:

$$R(x, y) = (X \text{ AND } Y), \quad x \in X, y \in Y \quad (\text{A.19})$$

Una relación difusa $R(x, y)$ es un subconjunto de $X \times Y$.

Para la función de pertenencia $\mu(x, y)$

$$R = \{\mu(x, y) : X \times Y \rightarrow [0,1]\} \quad (\text{A.20})$$

o

$$R = \{(x, y), \mu_R(x, y)\} = \bigcup (x, y) \mu_R(x, y) \quad (\text{A.21})$$

Una relación difusa con conjuntos X_1, X_2, \dots, X_n es un subconjunto difuso de $X_1 \times X_2 \dots \times X_n$

$$R_n = \{\mu(x_1, x_2, \dots, x_n) : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow [0,1]\} \quad (\text{A.22})$$

o

$$R_n = \bigcup \{(x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n)\} : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow [0,1] \quad (\text{A.23})$$

Una relación difusa puede ser representada por:

- Función de pertenencia (*membership*)
- Matriz (tabla) si el número de elementos es finito
- Imagen con sombras grises correspondientes al valor de μ

A.4.1. Proyección de las relaciones difusas

En una relación difusa binaria se pueden definir dos proyecciones:

- Primera proyección: $R^{(1)} = \{x, \text{máx}_y \mu(x, y)\} \quad x, y \in X \times Y$
- Segunda proyección: $R^{(2)} = \{y, \text{máx}_x \mu(x, y)\} \quad x, y \in X \times Y$

La proyección global (también conocida como la dimensión de la relación) es dada por:

$$R^g = \text{máx}_x \text{máx}_y \mu(x, y) \quad (\text{A.24})$$

Una relación difusa es llamada "normal", si la proyección global es 1. Las operaciones entre conjuntos difusos pueden ser extendidas a relaciones, por ejemplo, intersección, unión, etc.

A.4.2. Composición de las relaciones

La combinación de conjuntos difusos y relaciones difusas es llamada "composición".

Dado:

$$R(x, y) \quad (x, y) \in X \times Y \quad R : X \times Y \rightarrow [0,1] \quad (\text{A.25})$$

$$S(y, z) \quad (y, z) \in Y \times Z \quad S : Y \times Z \rightarrow [0,1] \quad (\text{A.26})$$

Composición $C(x, z)$

- Composición max-min:

$$\mu_c(x, z) = \max\{\min(\mu_R(x, y), \mu_S(y, z))\} \quad x \in X, y \in Y, z \in Z \quad (\text{A.27})$$

- Composición producto máximo:

$$\mu_c(x, z) = \max\{\mu_R(x, y)\mu_S(y, z)\} \quad x \in X, y \in Y, z \in Z \quad (\text{A.28})$$

A.5. RAZONAMIENTO APROXIMADO

A.5.1. Introducción

El razonamiento aproximado es una destacada forma de lógica difusa; esta, usa un grupo de reglas de inferencia. Estas reglas de inferencia usan proposiciones difusas como premisas. La salida de las reglas de inferencia es un conjunto de conclusiones. En el caso de los conjuntos clásicos (*crisp*), estos son verdaderos o falsos; pero cuando las reglas de inferencia usan premisas difusas, las conclusiones tienen un cierto grado de verdad.

A.5.2. Variables lingüísticas

Lotfi Zadeh [53] define una variable lingüística de la siguiente manera: "Por una variable lingüística nos referimos a una variable cuyos valores son palabras o frases en un lenguaje natural o artificial. Por ejemplo, la edad es una variable lingüística si sus valores son lingüísticos en lugar de numéricos. Por ejemplo: *joven, no joven, muy joven, demasiado joven, viejo, no muy viejo y no muy joven, etc.* en lugar de 20, 21, 22, ..."

Driankov [23] representa una variable lingüística y su estructura como:

$$\langle X, LX, \mathcal{X}, M_x \rangle \quad (\text{A.29})$$

donde X denota el nombre de la variable simbólica, por ejemplo: *edad, altura, velocidad, presión, error, cambio del error, etc.* LX es el conjunto de valores lingüísticos que X puede tomar. En el caso de la variable *edad* A tenemos:

$$LA = \{\text{muy joven, joven, adulto, maduro, viejo, muy viejo}\}$$

En sistemas de control, las variables lingüísticas son normalmente el *error* y el *cambio del error* y el conjunto es representado habitualmente por $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, donde NB significa "Grande Negativo" (*Negative Big*), NM "Mediano Negativo" (*Negative Medium*), ZO "Cero" (*Zero*), etc. LX es llamado también el conjunto de términos de X o el conjunto de referencia de X . \mathcal{X} es el dominio físico de las variables; por ejemplo, para la variable *edad*, el dominio podría ser $[0, 95]$. \mathcal{X} es también llamada U o el universo del discurso y puede ser continua o discreta. M_x es una función semántica que da una interpretación del valor lingüístico en términos de los elementos cuantitativos de \mathcal{X} . Esto es, el conjunto de la función de pertinencia en el universo del discurso \mathcal{X} , por ejemplo:

$$M_x : LX \rightarrow \widetilde{LX} \quad (\text{A.30})$$

A.6. ESTRUCTURA GENERAL DE UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO

Un sistema de inferencia difuso es un sistema de inferencia basado en reglas lingüísticas generadas algunas veces por el conocimiento empírico. Primero, los valores clásicos (*crisp*) provenientes de mediciones cuantitativas son convertidos en valores lingüísticos (\mathcal{LX}). Este proceso es llamado fusificación (*fuzzification*). El proceso de fusificación usa las funciones de pertenencia para hacer tal conversión.

A.6.1. Reglas de control como una representación del conocimiento

Después de la fusificación, las reglas de control pueden ser aplicadas. Estas reglas son representadas en la forma *IF... AND... THEN... OR ELSE* y representan el conjunto de decisiones donde las variables de entrada pertenecen a ciertos conjuntos difusos. La consecuencia de la regla es calculada como una composición max-min.

```

if  $\mathcal{L}A_1$  and  $\mathcal{L}B_1$  and ... and  $\mathcal{L}N_1$  then  $\mathcal{L}U_1$ 
or else
if  $\mathcal{L}A_1$  and  $\mathcal{L}B_1$  and ... and  $\mathcal{L}N_2$  then  $\mathcal{L}U_2$ 
or else
:
or else
if  $\mathcal{L}A_N$  and  $\mathcal{L}B_N$  and ... and  $\mathcal{L}N_N$  then  $\mathcal{L}U_N$ 

```

Representado en la forma de una relación difusa:

$$R : R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_{i=1}^N (\mathcal{L}A_i \times \mathcal{L}B_i \times \dots \times \mathcal{L}N_i \times \mathcal{L}U_i) \quad (\text{A.31})$$

Puesto a que la operación *AND* puede ser representada como una operación *min* y la operación *OR* puede ser representada como la operación *max*, la regla se puede representar como:

$$R(\mu_A(l), \mu_B(j), \dots, \mu_U(k)) = \max_{1 \leq i \leq N} \{ \mathcal{L}A_i(\mu_A(l)) \wedge \mathcal{L}B_j(\mu_B(j)) \wedge \dots \wedge \mathcal{L}U_i(\mu_U(k)) \} \quad (\text{A.32})$$

A.6.2. Defusificación

Después del proceso de inferencia, el resultado del proceso tiene que ser convertido en un valor clásico (*crisp*). Este procedimiento es llamado defusificación (*defuzzification*). Algunos métodos de defusificación son:

- Centro de área o gravedad
- Centro de sumas
- Altura

La influencia del método de defusificación utilizado en el desempeño del controlador es despreciable.

Centro de área o gravedad

Para sistemas discretos:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_U(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_U(x_i)} \quad (\text{A.33})$$

Para funciones de pertenencia continuas:

$$x^* = \frac{\int_U x \mu_U(x) dx}{\int_U \mu_U(x) dx} \quad (\text{A.34})$$

Centro de sumas

Para sistemas discretos:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{k=1}^l \mu_k(x_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l \mu_k(x_i)} \quad (\text{A.35})$$

Para funciones de membresía continuas:

$$x^* = \frac{\int_U x \sum_{k=1}^l \mu_k(x) dx}{\int_U \sum_{k=1}^l \mu_k(x) dx} \quad (\text{A.36})$$

Altura

Este método toma el valor máximo de cada consecuencia y hace una suma ponderada de estos, donde los pesos son el grado de pertenencia de la regla disparada. El método es igual al del centro de gravedad cuando las consecuencias de las funciones de pertenencia son *singletons*. Usando *singleton* como las funciones de pertenencia de las consecuencias, la función de pertenencia de la *i*-ésima consecuencia es:

$$\mu_i(x) = 1 \quad \text{si } x = x_i \quad (\text{A.37})$$

$$\mu_i(x) = 0 \quad \text{si } x \neq x_i \quad (\text{A.38})$$

Usando la defusificación usando este método generará la siguiente expresión:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^L x_i \mu_i(x)}{\sum_{i=1}^L \mu_U(x)} \quad (\text{A.39})$$

Este método es computacionalmente rápido y genera valores continuos, lo que es muy útil para la aproximación de la función.