



UNPA
Universidad del Papaloapan
Terra Urberrima, Mena Agoria

División de estudios de posgrado

**Sintonización de Controladores y
Comparación de Conceptos de Diseño
Aplicando la Optimalidad de Pareto. Un
caso de estudio del Bioreactor de Cholette**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS

Presenta:

Leonardi Martín Torralba Morales

Director de Tesis
Dr. Jesús Carrillo Ahumada
Instituto de Química Aplicada
Universidad del Papaloapan (UNPA)(México)

Co-Director de Tesis
Dr. Gilberto Reynoso Meza
Programa de Posgrado en Ingeniería de la Producción
y Sistemas (PPGEPS)
Pontificia Universidad Católica de Paraná (PUCPR) (Brasil)

Loma Bonita, Oaxaca, México 2018.



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP/2018/024
ASUNTO	Autorización de impresión de tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, México a 4 de mayo de 2018

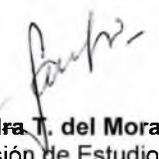
L. P. YESENIA BARRIENTOS ARENAL
JEFA DE SERVICIOS ESCOLARES
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Sirva la presente para informarle que el jurado del examen para obtener el grado de Maestro en Optimización y Control de Sistemas del **C. Leonardi Martín Torralba Morales**, matrícula 13070002, ha autorizado la impresión del manuscrito que lleva por título **"Sintonización de controladores y comparación de diseño aplicando la optimalidad de Pareto. Un caso de estudio del biorreactor de Cholette"** para su posterior presentación y defensa por parte del sustentante.

Sin otro asunto en particular, me despido quedando atenta ante cualquier duda y deseándole suerte en todas sus actividades.

Atentamente

terra uberrima, mens aperta
Bøu Lo-tama, chí jí jú


Dra. Sandra T. del Moral Ventura
Jefe de la División de Estudios de Posgrado



C.c.p. C. Leonardi Martín Torralba Morales.
C.c.p. Archivo

CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01(287)8759240

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01(281)8729230



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN OPTIMIZACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS

OFICIO	DEP/MOCS/2018/003
ASUNTO	Jurado de Revisión de tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, México a 21 de marzo de 2018

C. LEONARDI MARTÍN TORRALBA MORALES
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN OPTIMIZACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Por este medio le informo que el jurado de su examen para obtener el grado de Maestría en Optimización y Control de Sistemas estará integrado por los siguientes investigadores.

Dr. Hiram N. García Lozano	UNPA	Presidente
Dr. Jesús Carrillo Ahumada	UNPA	Vocal
Dr. Eduardo Sánchez Soto	UNPA	Secretario
Dra. Helem Sabina Sánchez	Universidad Politécnica de Cataluña	1er Suplente
M. C. Esteban Chávez Conde	UNPA	2º Suplente

Sin más por el momento, le envío saludos cordiales.

Atentamente

terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú



[Firma]
Dra. Sandra T. del Moral Ventura
Jefa de la División de Estudios
de Posgrado

C.c.p. Dr. Jesús Carrillo Ahumada – Director de tesis.
C.c.p. L. P. Yesenia Barrientos Arenal – Jefa de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo

[Firma]
M. en C. Héctor López Arana
Vice-rector Académico
Vo. Bo.



CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01(287)8759240

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01(281)8729230

Dedicatoria

*De manera muy especial quiero dedicar esta tesis a **mi esposa Beatriz** y a **mi hija Yaretzi(Torralbita)** por todo su amor, comprensión y apoyo incondicional que recibido por parte de ustedes. Saben que las amo y que este es un logro de los tres. A mi esposa especialmente por compartir conmigo cada momento de nuestra vida y su apoyo incondicional durante el tiempo que ha durado la maestría.*

*A **mis padres: Margarita y Francisco(D.E.P)** Por los valores que me inculcaron, además, por enseñarme con su ejemplo y sus consejos que con trabajo, dedicación y esfuerzo se logran las cosas.*

*A **mi tía Mary(D.E.P)** a quien también agradezco sus valiosos y sinceros consejos durante el tiempo que viví con ella.*

*A **mis hermanos** Conchita, Aurea, Rigo, Paco, Rocío, Pepe, Yovani y Ofir, porque siempre nos mantegamos unidos.*

Agradecimientos

*Quiero expresar un profundo y sincero agradecimiento a mis asesores: al **Dr. Jesús Carrillo Ahumada** y al **Dr. Gilberto Reynoso Meza** por su valioso tiempo, experiencia transmitida, orientación y gran apoyo durante el desarrollo de esta tesis.*

*También quiero expresar un sincero agradecimiento a mi jefe inmediato **L.C.P Rubén Jiménez Cervantes** Vice-Rector de Administración de la Universidad del Papaloapan por las facilidades laborales de trabajar y estudiar la maestría al mismo tiempo.*

*Expreso también mi agradecimiento a la **Universidad del Papaloapan**, que además de ser mi centro de trabajo, me ha brindado la oportunidad de estudiar la maestría impartida en esta misma Institución.*

*Quiero agradecer también al **comité revisor** de esta tesis por su tiempo empleado en las correcciones y comentarios de la misma, los cuales han servido para mejora de la misma.*

*Agradezco también a mis compañeros del Departamento de Red: **David, Gerardo, Gaspar y José Luis** por gran apoyo laboral.*

Resumen

Leonardi Martín Torralba Morales. Maestría en Optimización y Control de Sistemas. Universidad del Papaloapan. 2018. **“Sintonización de controladores y Comparación de Conceptos de Diseño Aplicando la Optimalidad de Pareto. Un caso de estudio del Bioreactor de Cholette”**. Directores de tesis: Dr. Jesús Carrillo Ahumada (UNPA) y Dr. Gilberto Reynoso Meza (PUCPR).

Las variantes del control lineal PI(D), por ejemplo: PI, PwI, PID, PIDn, siguen siendo las estructuras de control (conceptos de diseño) más utilizadas para procesos industriales en la actualidad. Para el control de dichos procesos es necesario realizar un ajuste (sintonización) en lazo cerrado de sus parámetros con la finalidad de llevar al sistema a un estado deseado. Existen diferentes metodologías de sintonización de conceptos de diseño, entre ellas la metodología de optimización multiobjetivo. Esta última controla a un sistema de estudio cumpliendo diferentes objetivos de diseño. Una de las técnicas utilizadas actualmente es la optimización mediante el uso de algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA).

Para llevar a cabo el proceso de optimización en esta tesis se desarrolló una metodología que consiste en varias etapas. La primer etapa, consiste en buscar y establecer una región de estabilidad para garantizar el funcionamiento adecuado del control. La segunda etapa, consiste en tomar la región de estabilidad como base (población inicial) para llevar a cabo un proceso de optimización multiobjetivo el cual proporciona como resultado un conjunto de soluciones óptimas llamado conjunto y frente de Pareto respectivamente. Tomando los resultados obtenidos, la tercer etapa, consiste en realizar un análisis multicriterio mediante diagramas de dispersión, coordenadas paralelas, así como también se llevó a cabo la simulación en el dominio del tiempo para la señal de salida del sistema controlado y de la señal de control. Esta metodología fue desarrollada para el sistema de estudio (bioreactor de Cholette) el cual es un reactor tipo tanque agitado (CSTR) con mezclado no ideal y con múltiples estados estacionarios, algunos de ellos inestables. Esta metodología puede ser aplicada a otros problemas de ingeniería de control.

En este trabajo se llevó a cabo un proceso de optimización de dos índices: ITSE, TVU en los escenarios regulatorio y servo ($ITSE_{regulatorio}$, $ITSE_{servo}$, $TVU_{regulatorio}$, TVU_{servo}) para evaluar el error y la señal de control en los cuatro conceptos de diseño: PI, PwI, PID y PIDn aplicados a un mismo estado estacionario.

Finalmente, se llevó a cabo una comparación entre el PI y PwI debido a que para estos dos conceptos de diseño se utilizó el modelo que consta de dos ecuaciones, una ecuación diferencial (concentración de sustrato dentro del bioreactor) y una ecuación algebraica (concentración de sustrato en la salida del bioreactor). Para esta comparación se observó que el PwI es el más adecuado cuando se desea conocer la concentración en la salida. La segunda comparación se llevó a cabo entre el PID y PIDn debido a que para estos dos conceptos de diseño se utilizó el modelo que consta solo de la ecuación diferencial (concentración de sustrato dentro del bioreactor) y para dicha comparación se observó que el concepto de diseño PID es el más adecuado.

Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios, ya que en la metodología desarrollada que consiste en la optimización y comparación de diferentes conceptos de diseño (aportación principal de esta tesis) permite tener una mejor comprensión de una solución conceptual y así justificar el uso de un concepto de diseño complejo o un concepto diseño simple. De lo anterior, se determina así cual concepto de diseño representa mejor las necesidades del ingeniero de control o diseñador.

Abstract

Leonardi Martín Torralba Morales, Maestría en Optimización y Control de Sistemas. Universidad del Papaloapan. 2018. **“Sintonización de controladores y Comparación de Conceptos de Diseño Aplicando la Optimalidad de Pareto. Un caso de estudio del Bioreactor de Cholette”**. The advisors: Dr. Jesús Carrillo Ahumada (UNPA) y Dr. Gilberto Reynoso Meza (PUCPR).

The variants of lineal control PI(D), for example: PI, PwI, PID, PIDn, are still the control structures (Design Concepts) most used for the industrial process currently. For control, such processes are necessary to make a tuning adjustment in a closed loop of their parameters in order to bring the system to a desired state. There are different methodologies for tuning design concepts, including the multiobjective optimization. This methodology controls a study system fulfilling different design objectives. One of the techniques currently used is optimization through the use of multiobjective evolutionary algorithms (MOEA).

To carry out the optimization process in this thesis, a methodology was developed consisting of several stages. The first stage consists in searching and establishing a stability region to guarantee the proper functioning of the control. The second stage consists taking the stability region as a base (initial population) to carry out a multiobjective optimization process, which provides as a result a set of optimal solutions called the Pareto set and Pareto front respectively. Taking the result obtained, the third stage consists in performing a multicriteria analysis by means of scatter diagrams and parallel diagrams, also a simulation was carried out in the time domain for the output signal of the controlled system, as well as the control signal. This methodology was developed for the study system (Cholette Bioreactor), which is a stirred tank reactor (CSTR) with no ideal mixing and multiple stationary states, with some of them unstable. This methodology can be applied to other control engineering problems.

In this work, an optimization process of two indices was carried out: ITSE and TVU in the regulatory and servo scenarios ($ITSE_{regulatory}$, $ITSE_{servo}$,

$TVU_{regulatory}$, TVU_{servo}) to evaluate the error and control signal in the four design concepts: PI, PwI, PID and PIDn applied to the same steady state.

Finally a comparison was made between PI and PwI, because for these two design concepts we used the model consisting of two equations, a differential equation (substrate concentration within the bioreactor) and an algebraic equation (concentration of substrate at the exit of the bioreactor). In this comparison, it was observed that the PwI is the most suitable when it is essential to know the concentration in the output. The second comparison was carried out between PID and PIDn because for these two design concepts the model used consisted only of the differential equation (concentration of substrate within the bioreactor) and for this comparison it was observed that the PID design concept is the most suitable.

The result obtained is considered satisfactory, since, in the methodology developed, that consists in the optimization and comparison of different design concepts (the main contribution of this thesis) and allows us to have a better understanding of a conceptual solution and thus justify the use of a complex design concept or a simple design concept. From the above, it is determined which design concept best represents the needs of the control engineer or designer.

Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Acrónimos	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XVII
Justificación, objetivos, estructura, contribuciones y trabajos relacionados de esta tesis	1
Justificación de la tesis	1
Objetivos	2
Estructura de la tesis	3
Contribuciones de la tesis	4
Trabajos relacionados con la propuesta de tesis	5
1. Ingeniería de Control	7
1.1. Introducción	7
1.2. Controlador Proporcional Integral y Derivativo (PID)	8
1.2.1. Estabilidad	9
1.3. Sistemas lineales	10
1.4. Sistemas no lineales	11
1.4.1. Ejemplos de Sistemas no lineales controlados	11
1.4.1.1. Generación de energía	11
1.4.1.2. Reactores químicos	12
1.4.1.3. Reactor para convertir metilciclopentano a benceno	12
1.4.1.4. Bioreactor de Cholette	12
1.5. Evaluación de sistemas lineales y no lineales controlados en dominio del tiempo	20

2. Optimización	23
2.1. Introducción	23
2.2. Optimización Multiobjetivo (MOO)	24
2.2.1. Planteamiento de un problema de optimización multi- objetivo	27
2.3. Optimización mediante Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo .	29
2.4. Etapa de Toma de Decisiones (MCDM)	32
2.5. Ejemplo de Optimización Multiobjetivo	36
2.5.1. Primera etapa - Análisis y planteamiento del problema	37
2.5.2. Segunda Etapa - Metodología de diseño mediante op- timización multi-objetivo aplicada al ajuste de contro- ladores PI	38
2.5.3. Tercer etapa- Resultados del análisis del frente de Pa- reto y de la implementación de los controladores se- leccionados	39
3. Metodología	45
3.1. Planteamiento de la metodología para establecer una región de estabilidad	45
3.2. Metodología de optimización	48
3.2.1. Planteamiento del problema y del proceso de optimi- zación	48
3.2.2. Análisis del conjunto de Pareto en diagramas de dis- persión	49
3.2.3. Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas	50
3.3. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Pa- raalelas	53
3.4. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo	54
3.5. Comparación y elección de conceptos de diseño	57
3.5.1. Resumen de la metodologías por medio de un diagra- ma de flujo	58
4. Caso de Estudio	61
4.1. Diferentes conceptos de diseño en un mismo estado estacionario	61
4.1.1. Planteamiento de la región de estabilidad	61
4.1.2. Planteamiento del problema de optimización	63
4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI	64
4.2.1. Resultados de optimización para el concepto de diseño PI utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE .	65
4.2.2. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coorde- nadas Paralelas	68

4.2.3.	Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo	71
4.3.	Concepto de diseño PwI	76
4.3.1.	Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PwI	76
4.3.2.	Resultados de optimización para el concepto de diseño PwI utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE	77
4.3.3.	Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PwI	79
4.3.4.	Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PwI	82
4.3.5.	Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PwI	85
4.4.	Concepto de diseño PID	90
4.4.1.	Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PID	90
4.4.2.	Resultados de optimización para el concepto de diseño PID utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE.	90
4.4.3.	Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PID	95
4.4.4.	Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas para con concepto de diseño PID	98
4.4.5.	Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PID	101
4.5.	Concepto de diseño PIDn	106
4.5.1.	Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PIDn	106
4.5.2.	Resultados de optimización para el concepto de diseño PIDn utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE.	106
4.5.3.	Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PIDn	107
4.5.4.	Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas para con concepto de diseño PIDn	112
4.5.5.	Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PIDn	115
4.6.	Comparación de conceptos de diseño	120
4.6.1.	Comparación de frentes de Pareto entre los conceptos de diseño PI y PwI	120
4.6.1.1.	Simulación en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PI y PwI. Escenario regulatorio	123

4.6.1.2.	Simulación en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PI y PwI. Escenario servo	125
4.6.2.	Comparación de frentes de Pareto entre los conceptos de diseño PID y PIDn	127
4.6.3.	Simulación y comparación en el dominio del tiempo entre los conceptos de diseño PID y PIDn en escenario regulatorio	130
4.6.3.1.	Simulación en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PID y PIDn. Escenario servo	132
5.	Conclusiones	135
5.1.	Conclusiones	135
5.1.1.	Conclusiones de estabilidad en los sistemas	135
5.1.2.	Conclusiones sobre sintonización de conceptos de diseño	136
5.1.3.	Conclusiones sobre comparativos de conceptos de diseño	136
5.1.4.	Trabajo futuro	137
5.1.5.	Limitaciones	138
Apéndices		139
Apéndice A		141
Apéndice B		143
Apéndice C		145
Apéndice D		147
Referencias		149

Acrónimos

AOF Aggregate Objective Function

CSTR Continuous Stirred Tank Reactor

DE Differential Evolution

DM Decision Maker

DNMOEA/HI Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Hypervolume Indicator

EA Evolutionary Algorithm

ev-MOGA ev-dominance MultiObjective Genetic Algorithm

GDE3 Third Evolution step of Generalized Differential Evolution

GFCL Generate First, Choose Later

I-PD Integral menos Proporcional-Integral

LD Level Diagrams

MCDM Multiple Criteria Decision Making

MIMO Multiple Input, Multiple Output

MODE Multiobjective Differential Evolution

MOEA Multiobjective Evolutionary Algorithm

MOEA/D Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition

MOO Multiobjective Optimization

MOOD Multiobjective Optimization Design

MOP Multiobjective Problem

NPGA Niche Pareto Genetic Algorithm

NSGA-II Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II

PC Paralell Coordinate

PI Proporcional-Integral

PID Proporcional-Integral-Derivativo

PIDn Proporcional-Integral-Derivativo con filtro

P_f Pareto Front

P_s Pareto Set

PwI Proporcional-Integral con ponderación

SISO Single Input, Single Output

SPEA Strength Pareto Evolutionary Algorithm

sp-MODE Multiobjective Differential Evolution with Spherical Pruning

Índice de figuras

1.1. Lazo de control básico.	8
1.2. Principio de superposición.	10
1.3. Representación esquemática del bioreactor de Cholette propuesto por Chidambaram y Reddy (1996).	13
1.4. Cambio en q de $3.33 \times 10^{-05} m^3 s^{-1}$ a $3.66 \times 10^{-05} m^3 s^{-1}$ manteniendo constante $c_f = 3.28 kg mol m^{-3}$	14
1.5. Cambio en c_f de $3.28 kg mol m^{-3}$ a $6.4843.28 kg mol m^{-3}$ manteniendo constante $q = 3.33 \times 10^{-05} m^3 s^{-1}$	15
1.6. Dinámica no lineal de c ante cambios en q y c_f mostrados en las figuras 1.4 y 1.5.	15
1.7. Dinámica no lineal de c_e ante cambios en q y c_f mostrados en las figuras 1.4 y 1.5.	16
1.8. Representación de una estructura de control Paralela (PSC).	20
2.1. Enfoque de resolución de un problema multiobjetivo, mediante AOF.	25
2.2. Enfoque de resolución de un problema multiobjetivo mediante GFCL.	26
2.3. Definición de optimalidad de Pareto y dominancia.	28
2.4. Representación del espacio de variables de decisión y su correspondiente espacio de objetivos.	30
2.5. Diseño de un problema de optimización multiobjetivo (Reynoso-Meza, Garcia-Nieto, Sanchis, y Blasco, 2013).	31
2.6. Diagramas de Dispersión de índices de desempeño vs k_p	33
2.7. Diagramas de Dispersión de índices de desempeño vs. k_i	33
2.8. Diagramas de Dispersión de índices de desempeño vs. k_d	34
2.9. Frente de Pareto en coordenadas paralelas.	35
2.10. Conjunto de Pareto en coordenadas paralelas.	35
2.11. Frente de Pareto en Diagramas de Nivel.	36
2.12. Conjunto de Pareto en Diagramas de Nivel.	36
2.13. Región de búsqueda estable (color azul).	38
2.14. Conjunto de Pareto.	40
2.15. Conjunto de Pareto.	41

2.16. Concepto de diseño PI, escala logarítmica.	42
2.17. Resultados de la simulación	43
3.1. Representación de la zona de estabilidad del sistema.	47
3.2. Representación de la estabilidad del sistema para un concepto de diseño PI.	51
3.3. Representación de regiones de estabilidad del sistema en lazo cerrado.	52
3.4. Representación del frente de Pareto de un concepto de diseño PI.	54
3.5. Salida del sistema, escenario regulatorio.	55
3.6. Señal de control, escenario regulatorio.	55
3.7. Salida del sistema, escenario servo.	56
3.8. Señal de control, escenario servo.	56
3.9. Cuatro conceptos de diseño diferentes.	58
3.10. Comparación general de frentes de Pareto para cuatro conceptos de diseño.	59
3.11. Comparación cuantitativa de cuatro conceptos de diseño.	59
3.12. Diagrama de flujo para el proceso de optimización.	60
4.1. Zona de estabilidad para el concepto de diseño PI.	64
4.2. Gráfica de superficie formada por k_p , k_i y Abscisas.	66
4.3. Gráfica de superficie, vista k_p vs k_i	67
4.4. Relación entre ganancias y abscisas espectrales.	69
4.5. Relación entre ganancias y abscisas espectrales.	70
4.6. Frentes de Pareto en coordenadas paralelas.	72
4.7. Salida del sistema y señal de control, del sistema no lineal para el concepto de diseño PI. Escenario regulatorio.	74
4.8. Salida del sistema y señal de control del sistema no lineal, para el concepto de diseño PI. Escenario servo.	75
4.9. Zona de estabilidad para el concepto de diseño PwI.	76
4.10. Relación entre parámetros de control y Abscisas espectrales.	78
4.11. Relación entre parámetros de control y Abscisas espectrales.	80
4.12. Coordenadas Paralelas, frente de Pareto, concepto de diseño PwI.	81
4.13. Análisis del conjunto de Pareto para el concepto de diseño PwI.	83
4.14. Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PwI.	85
4.15. Vista a detalle de la Fig. 4.14 con valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PwI.	86
4.16. Señal de salida y de control para un concepto de diseño PwI.	88
4.17. Salida del sistema y señal de control servo, PwI.	89
4.18. Zona de estabilidad para el concepto de diseño PID.	91

4.19. Conjunto de Pareto del concepto de diseño PID.	92
4.20. Relación entre parámetros de control y Abscisas espectrales. .	93
4.21. Ganancias k_i vs k_d vs abscisas.	94
4.22. Coordenadas Paralelas, conjunto de Pareto, concepto de di- seño PID.	96
4.23. Análisis del conjunto de Pareto para el concepto de diseño PID.	97
4.24. Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PID.	99
4.25. Análisis del frente de Pareto para el concepto de diseño PID.	102
4.26. Señal de salida del sistema y de control para un concepto de diseño PID.	104
4.27. Señal de salida y de control para un concepto de diseño PID.	105
4.28. Zona de estabilidad para el concepto de diseño PIDn.	107
4.29. Conjunto de Pareto para el concepto de diseño PIDn.	108
4.30. Soluciones que representan mayor estabilidad para el concep- to de diseño PIDn.	109
4.31. Soluciones que representan estabilidad intermedia para el con- cepto de diseño PIDn.	109
4.32. Soluciones que representan poca estabilidad para el concepto de diseño PIDn.	110
4.33. Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PIDn.	112
4.34. Análisis del frente de Pareto para el concepto de diseño PIDn.	113
4.35. Señal de salida y de control para un concepto de diseño PIDn. Escenario regulatorio	116
4.36. Señal de salida y de control para un concepto de diseño PIDn.	117
4.37. Comparación de frentes de Pareto PI y PwI.	121
4.38. Comparación de medias para los conceptos de diseño PI y PwI	122
4.39. Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PI y PwI en el escenario Regu- latorio.	124
4.40. Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PI y PwI en el escenario servo. .	126
4.41. Comparación de frentes de Pareto PID y PIDn.	128
4.42. Comparación de medias para los conceptos de diseño PID y PIDn	129
4.43. Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PID y PIDn en el escenario re- gulatorio.	131
4.44. Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PID y PIDn en el escenario servo.	133

Índice de tablas

1.1. Parámetros de las variables de estado del bioreactor de Cholette (Chidambaram y Reddy, 1996).	13
1.2. Revisión de modelos y controladores para el bioreactor de Cholette.	17
1.3. Índices de desempeño para los escenarios servo/regulatorio . .	22
3.1. Intervalos de espacio inicial de búsqueda, región de estabilidad, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el algoritmo 1 para el concepto de diseño PI.	47
3.2. Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valor mínimo y máximo de abscisas espectrales obtenidas mediante el algoritmo de optimización multiobjetivo para el concepto de diseño PI. . .	49
3.3. Definición de las tres zonas de estabilidad.	53
4.1. Cuatro conceptos de diseño aplicado a un punto de operación. .	61
4.2. Espacio general de búsqueda de estabilidad para cada concepto de diseño.	62
4.3. Intervalos de espacio de búsqueda inicial, zona de estabilidad, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PI.	65
4.4. Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PI.	68
4.5. Espacio inicial de búsqueda, zona de estabilidad, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PwI.	77
4.6. Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PwI.	79
4.7. Espacio inicial de búsqueda, zona de estabilidad, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PID.	90

4.8. Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PID.	91
4.9. Espacio inicial de búsqueda, zona de estabilidad, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PIDn.	106
4.10. Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PIDn.	107
4.11. Comparación de conceptos de diseño, a partir de la media aritmética	123
4.12. Comparación de conceptos de diseño PID y PIDn, a partir de la media aritmética	129

Justificación, objetivos, estructura, contribuciones y trabajos relacionados de esta tesis

Justificación de la tesis

El problema de estudio que se aborda en este trabajo de investigación es el bioreactor de Cholette propuesto por [Chidambaram y Reddy \(1996\)](#). Dicho bioreactor es un sistema con un comportamiento no lineal y en algunos casos presenta multiplicidad de estados estacionarios con comportamiento inestable.

De acuerdo a la investigación bibliográfica realizada (Capítulo 1, Tabla 1.2), éste bioreactor ha sido ampliamente estudiado aplicando diferentes estructuras de control (PI, PwI, I-PD, PID, PIDn, entre otros.) y con diferentes técnicas de sintonización. En su mayoría se han utilizado técnicas de sintonización de controladores aplicando el método de síntesis (([Shariati, Taghirad, y Fatehi, 2014](#)), ([Sree y Chidambaram, 2003b](#)), ([Jhunjhunwala y Chidambaram, 2001](#)), ([Ibarra-Junquera y Rosu, 2007](#)), ([Carrillo-Ahumada, Páramo-Calderón, Aparicio-Saguilán, Rodríguez-Jimenes, y García-Alvarado, 2014](#))), entre otros métodos. Otras contribuciones de diferentes investigadores, como por ejemplo, [Carrillo-Ahumada, Rodríguez-Jimenes, y García-Alvarado \(2011\)](#), [Rajinikanth y Latha \(2012b\)](#) han llevado a cabo el proceso de sintonización por medio de optimización multiobjetivo utilizando el algoritmo simplex modificado y un algoritmo de optimización simil de bacterias, respectivamente.

La comparación entre estructuras diferentes de controladores suele hacerse puntualmente. Lo anterior quiere decir que las pruebas suelen limitarse a un único experimento, para un ajuste específico de los parámetros de cada controlador. Una prueba integral puede ser llevada a cabo usando

las herramientas de la optimización multiobjetivo, donde el intercambio de prestaciones entre estructuras puede ser analizado de forma global. En el argot multiobjetivo, dicho análisis global de prestaciones, suele ser denominado como una comparación de conceptos de diseño.

El análisis y la comparación de conceptos de diseño para el bioreactor de Cholette ha sido abordado por, (Carrillo-Ahumada y cols., 2011), (Carrillo-Ahumada, Reynoso-Meza, García-Nieto, Sanchis, y García-Alvarado, 2015), (Pan y Das, 2015), (Naranjani, Sardahi, Chen, y Sun, 2015), (Chen, Yuan, Ji, Wang, y Tian, 2014), en un solo estado estacionario. En específico se ha realizado el análisis y comparación con una sola solución de diferentes conceptos de diseño (Rodríguez-Mariano y cols., 2015) en diferentes condiciones de operación (**condición de operación 1:** concentración de sustrato, **condición de operación 2:** concentración de sustrato y concentración de salida mediante bypass).

Tras analizar los trabajos citados anteriormente, se observa que no se ha realizado una metodología sistematizada para la evaluación de diferentes conceptos de diseño de manera global ante diferentes condiciones de operación, como se menciona en el párrafo anterior.

Con la motivación descrita anteriormente, en esta tesis se plantea llevar a cabo una metodología sistematizada del bioreactor antes mencionado, proporcionando información importante acerca del comportamiento del sistema ante diferentes conceptos de diseño, utilizando sus respectivos frentes de Pareto para decidir cual concepto proporciona el mejor desempeño. Las ventajas de llevar a cabo una metodología sistematizada de comparación de conceptos de diseño es que se pueden observar las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos, ante los cambios servo (entrada de referencia) y regulatorio (entrada exógena).

Objetivos

Objetivo General

Analizar y desarrollar una metodología para la sintonización de controladores aplicados al Bioreactor de Cholette mediante la comparación de conceptos de diseño y técnicas multiobjetivo.

Objetivos Específicos

1. Sintonizar en un punto de operación un conjunto de conceptos de diseño para el Bioreactor de Cholette mediante un algoritmo de optimi-

zación multiobjetivo.

2. Evaluar por medio de coordenadas paralelas el rendimiento de cada concepto de diseño aplicado al caso de estudio.
3. Obtener una perspectiva global del rendimiento de cada concepto de diseño a partir su media aritmética.
4. Realizar simulaciones numéricas en dominio de tiempo del sistema de estudio con cada concepto de diseño.

Estructura de la tesis

Esta tesis, está dividida en cinco capítulos los cuales se describen a continuación:

En el **capítulo uno**, se proporciona una introducción dedicada al control automático y algunos conceptos (por ejemplo, los sistemas lineales, sistemas no lineales) así como también información enfocada al problema (Control de un bioreactor de Cholette) que es abordado en esta tesis.

En el **capítulo dos**, se provee una introducción al diseño mediante optimización multiobjetivo (*Multiobjective Optimization Design, MOOD*), dando detalle de las tres etapas principales: (a) La definición de un problema Multiobjetivo MOP (*Multiobjective Problem, MOP*), (b) Proceso de optimización multiobjetivo (*MultiObjective Optimization, MOO*) y (c) Etapa de toma de decisiones multicriterio (Multi-criteria Decision Making, MCDM).

En el **capítulo tres**, se describe la metodología general para llevar a cabo un proceso de sintonización de controladores en lazo cerrado y evaluación de los mismos utilizando diferentes estructuras de control (conceptos de diseño) que representa la aportación principal de esta investigación.

En principio, la metodología consiste en que el ingeniero de control o diseñador establece un intervalo inicial de búsqueda para cada uno de los parámetros de control, dependiendo de la estructura de control de la cual se trate. Por ejemplo, si es una estructura de control PID, entonces, se establecen tres intervalos de búsqueda para k_p , k_i y k_d . Una vez son establecidos dichos intervalos se ejecuta un algoritmo que tiene como tarea encontrar todas las soluciones estables posibles en los intervalos definidos anteriormente tomando como base los eigenvalores de la matriz característica.

Una vez que el diseñador se asegura de tener un conjunto de soluciones estables, toma estos resultados (como población inicial) para la siguiente

etapa de la metodología que consiste en llevar a cabo un proceso de optimización mediante un algoritmo evolutivo multiobjetivo. Dicho proceso de optimización tendrá como resultado un conjunto de soluciones óptimas denominado en el argot multiobjetivo conjunto de Pareto y su imagen respectiva en el espacio de objetivos llamado frente de Pareto. Posteriormente en ellos se lleva a cabo un análisis en coordenadas Paralelas, junto con un análisis en el dominio del tiempo. Finalmente se lleva a cabo una comparación entre los diferentes conceptos de diseño aplicados.

En el **capítulo cuatro** es abordado un caso práctico de estudio en el cual se aplica la metodología que ha sido descrita en el capítulo tres. Es decir, como primer paso, el diseñador establece un intervalo a partir del cual se busca una región de soluciones estables. Posteriormente, se toma el conjunto de soluciones estables como datos de entrada para el algoritmo evolutivo multiobjetivo e iniciar así el proceso de optimización y de esta manera obtener el conjunto y frente de Pareto respectivamente, a partir del cual se hace una evaluación del comportamiento del concepto de diseño. El procedimiento anterior se lleva a cabo para cada estructura de control aplicada al problema que se ha establecido como caso de estudio. Por lo tanto, al final se realiza un análisis de los frentes de Pareto de cada concepto de diseño para elegir el que mejor represente y cumpla las preferencias diseñador (*Decision Maker, DM*).

Finalmente, en el **capítulo cinco**, se proporcionan las conclusiones de la metodología aplicada, un análisis, evaluación y comparación entre los diferentes conceptos de diseño a partir de sus frentes de Pareto. Así como también se hacen sugerencias sobre trabajos futuros de esta tesis.

Contribuciones de la tesis

Dentro del ámbito de control automático. Actualmente existen muchas estructuras de control (PI, PwI, PID, PIDn, etc), así como también existe un gran número de métodos (técnicas) de sintonización, pero además también se ha vuelto una necesidad optimizar (maximizar o minimizar simultáneamente) varios objetivos al mismo tiempo. Una técnica que ha venido cobrando mucha fuerza es el uso de algoritmos evolutivos multiobjetivo. Pero surge una interrogante: Si existen muchas estructuras de control (conceptos de diseño) a las cuales se les puede aplicar un método de sintonización en algún punto de operación en específico de un problema en particular ¿cuál estructura de control, sería más conveniente utilizar? Por lo tanto, esta tesis da respuesta a la interrogante planteada, mediante las siguientes contribuciones:

1. Se plantea un algoritmo que busca y establece una región de estabilidad a partir de los valores propios de la matriz característica. Lo anterior

con la finalidad de definir automáticamente los intervalos de búsqueda que serán empleados en el proceso de MOO. Es importante mencionar que algoritmo puede ser aplicado a diferentes conceptos de diseño y puede ser aplicado a sistemas lineales.

2. Se propone un MOP estándar para el análisis de conceptos de diseño en sistemas de control. Con dicho MOP es posible evaluar las prestaciones de un controlador/estructura ante las respuestas servo y regulatorio.
3. Se propone una metodología que junto con un esquema de visualización de frentes de pareto permite detectar las zonas de estabilidad (poca, media y alta por ejemplo); así mismo permite la comparación entre conceptos de diseño (estructuras de control). Se establece una metodología de comparación de conceptos de diseño, a partir del frente de Pareto de cada uno de ellos utilizando como métrica la media aritmética para observar el comportamiento de cada uno de los índices utilizados ITSE y TVU.

Trabajos relacionados con la propuesta de tesis

Derivado de esta propuesta de tesis, se tienen los siguientes trabajos:

- 1.1. Presentación de Poster. **Torralba-Morales L.M., Reynoso-Meza G., García-Alvarado M.A. y Carrillo-Ahumada J.** “*Jornadas de Actualización e Investigación y desarrollo en Alimentos*”. Veracruz, Veracruz. 11 y 13 de Febrero de 2015. (Apéndice A).
- 1.2. Presentación de Poster. **Torralba-Morales L.M., Reynoso-Meza G., y Carrillo-Ahumada J.** “*IV Jornada de Ingeniería en Alimentos*”. Tuxtepec, Oaxaca 30-31 de octubre de 2017. Por publicarse. (Apéndice B).
2. Memoria en extenso. **Gilberto Reynoso-Meza, Jesús Carrillo-Ahumada, Leonardi Martín Torralba Morales.** “*Pareto Front Analysis of Control Structures in Multimodel Systems: The work scenario concept introduction*”. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente Porto Alegre - RS, 1°- 4 de Outubro de 2017. (Apéndice C).
3. Proyecto interno. **Carrillo-Ahumada J., Torralba-Morales L.M., Reynoso-Meza G.** “*Estudio comparativo de conceptos de diseño por medio de frentes de Pareto*”. Proyecto FO-UNPA/00017. Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec. 12 de Octubre de 2017. (Apéndice D).

Capítulo 1

Ingeniería de Control

1.1. Introducción

A pesar del desarrollo de una amplia gama de estrategias de control, el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) sigue siendo una de las estructuras de control más populares y ampliamente utilizada en la industria (Astrom y Hagglund, 2006). Con una estructura simple, confiable en su operación y robustez en su desempeño, le ha dado gran aceptación entre los ingenieros de control (Elbayomy, Zongxia, y Huaqing, 2008). Tanto es así, que se considera que más del 95 % de los controladores industriales son implementados todavía basándose en una estructura PID (O'Dwyer, 2009).

En Samad (2017) se muestra una encuesta realizada por la Federación Internacional de Control Automático (IFAC) sobre el impacto que han tenido las diferentes tecnologías de control en la industria. En especial el control PID lo califican con un 100 % de impacto en la industria y que aún no existe alguna tecnología que los reemplace.

Con los avances en la tecnología digital y la ciencia del control automático se han desarrollado una amplia gama de técnicas de sintonización para los lazos de control (Ang, Chong, y Li, 2005). Sin embargo, aunque en un primer momento no se obtenga el intercambio de prestaciones deseado, los mismos pueden servir como punto de partida para un proceso de re-sintonización.

En la práctica muchos sistemas de control, son electromecánicos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos, procesos químicos, sólo por mencionar algunos. Todos sus parámetros están acoplados lo que significa que la variación en alguno de ellos puede repercutir en los demás, por lo que es necesario buscar un ajuste que lleve al sistema a un estado estable y deseado.

A continuación se presentan algunos aspectos básicos de la estructura de un controlador PID.

1.2. Controlador Proporcional Integral y Derivativo (PID)

Es importante señalar que más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID (Ogata, 2010) y su uso ha ido en aumento a partir de la inclusión de las computadoras en los procesos ya que se han podido agregar más funciones, tales como la sintonización automática, adaptación y el diagnóstico en los sistemas.

Un controlador PID está constituido por tres términos esenciales, una parte Proporcional (P) que es una desviación del punto de ajuste ante el envío de una señal correctiva, una parte Integral (I) que representa el pasado de la señal y la parte Derivativa (D) que es una predicción mediante una extrapolación lineal de la señal del error de acuerdo con Astrom y Hagglund (2006).

Gráficamente, un lazo de control básico puede ser representado mediante la Figura 1.1. Esta comprende la función de transferencia $P(s)$ del proceso y la función de transferencia $C(s)$ del controlador. El objetivo de este lazo de control, es mantener la salida deseada $Y(s)$ del proceso en la referencia deseada $R(s)$. La relación entre $R(s)$ y $Y(s)$ es expresada de la siguiente forma $E(s) = R(s) - Y(s)$, en la cual $E(s)$ representa el error entre el valor deseado y la salida del sistema.

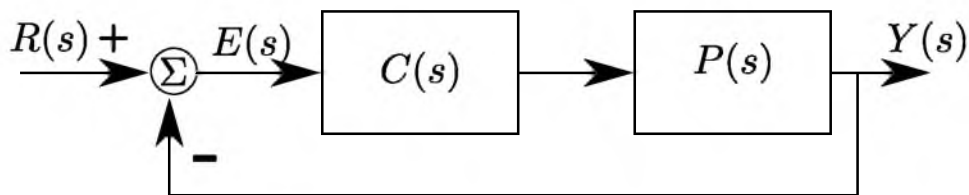


Figura 1.1: Lazo de control básico.

1.2. Controlador Proporcional Integral y Derivativo (PID)

El objetivo principal del diseño de un controlador PID, es buscar un conjunto de valores que mejor ajusten el comportamiento de dicho controlador para llevar el sistema a un comportamiento deseado por el ingeniero de control.

Para encontrar los valores de ajuste es necesario emplear técnicas de sintonización de tal manera que al combinarlas, estas permitan observar de que manera afectan o benefician las especificaciones y restricciones del concepto de diseño aplicado y por ende observar como afecta o beneficia el '*desempeño y robustez*' del sistema.

Aunque actualmente muchas técnicas de sintonización de controladores han sido desarrolladas, todas han demostrado que las estructuras de control PID y sus variantes han confirmado su gran utilidad y capacidad para aproximar la dinámica de un sistema a cero (Jin, Ryu, Sung, Lee, y Lee (2014), García-Alvarado, Ruiz-López, y Torres-Ramos (2005)), además de que proporcionan una buena compensación y un adecuado desempeño en la gran mayoría de las aplicaciones (W. Zhang, 2006) aportando un control satisfactorio y de acuerdo con Ogata (2010) esto les ha permitido a los controladores PID una gran aceptación en la industria.

1.2.1. Estabilidad

La estabilidad es una de las propiedades más importantes de los sistemas dinámicos. En consecuencia, la estabilidad de un sistema es una condición necesaria para la aplicación práctica de un sistema (Hendricks, Jannerup, y Sorensen, 2008). Si un sistema es no estable puede no funcionar correctamente y además es complicado de estudiar. También, Duan (2010) afirma que la estabilidad de un sistema dinámico describe el comportamiento de un sistema con respecto a las perturbaciones de la condición inicial y es considerada como una de las propiedades más importantes de los sistemas dinámicos.

Entonces, se puede decir, que en el diseño de sistemas de control (en lazo cerrado) la estabilidad es la propiedad más importante para los sistemas de estudio y consiste en linealizar las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema, obteniendo a partir de dicha linealización la ecuación característica del sistema y se ha demostrado que el sistema es estable si los eigenvalores de la ecuación característica (polos) son negativos, es críticamente estable si la parte real es cero y inestable si la parte real positiva.

Por lo tanto, el análisis de un sistema de control (estable) a partir de un sistema de ecuaciones lineales (como se menciona en el párrafo anterior) permitirá un mejor control del sistema en cuestión.

1.3. Sistemas lineales

Definición 1 Sistema Lineal (Chi, 1999). Un sistema es lineal, si tiene la propiedad de aditividad y homogeneidad ante la entrada de dos o más funciones, además que debe cumplir con el principio de superposición.

Es decir, que si se tiene $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $\dots y_n(t)$ como salidas de un sistema, para las entradas $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $\dots x_n(t)$ y además se tiene una constante real α . El sistema será lineal si y solo si:

$$\alpha x_1(t) + \alpha x_2(t) + \alpha x_3(t) + \dots + \alpha x_n(t) \rightarrow \alpha y_1(t) + \alpha y_2(t) + \alpha y_3(t) + \dots + y_n(t).$$

Cuando un sistema es linealizado en un punto de operación en específico, permite conocer su comportamiento en las proximidades de dicho punto un operación. El proceso de linealización puede ser representado por las ecuaciones (1.1) y (1.2), las cuales caracterizan el modelo de espacio de estados de un proceso (Khalil, 2002).

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = A(t)\mathbf{x} + B(t)\mathbf{u} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{y} = C(t)\mathbf{x} + D(t)\mathbf{u} \quad (1.2)$$

donde: $\mathbf{x}$ es el vector de variables estado del proceso, $\mathbf{u}$ es el vector de señales de entradas, $\mathbf{y}$ es el vector de salidas medidas y las matrices A , B , C y D , son conocidas como matrices de estado. Si éstas son constantes, entonces se dice que el proceso es lineal e invariante en el tiempo y además cumple con el principio de superposición (Fig. 1.2).

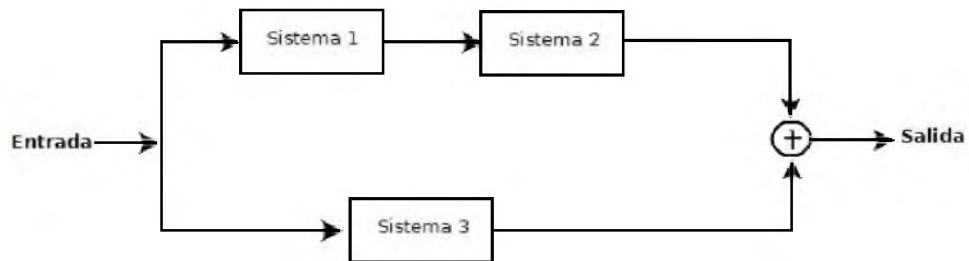


Figura 1.2: Principio de superposición.

1.4. Sistemas no lineales

Algunas veces es posible describir la operación de un sistema físico mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales ordinarias (modelo lineal) cuando por ejemplo, el modo de operación del sistema en estudio no se desvía demasiado de las condiciones de operación (punto nominal).

Pero al analizar el comportamiento de muchos sistemas es común encontrar que gran parte de ellos tienen un comportamiento altamente no lineal, es por ello que muchas leyes de control se enfocan en el análisis y estabilidad de estos sistemas. Ante tales situaciones es necesario llevar a cabo un proceso de linealización en un punto de operación en específico, debido a que un sistema linealizado es capaz de representar a un sistema no lineal en las cercanías de dicho estado y que fuera de esa región no hay garantía de la predicción de su comportamiento (Carrillo-Ahumada y cols. (2014)).

Entonces, dado que los sistemas no lineales son caracterizados por un comportamiento diverso y complejo, éste se puede definir como sigue:

Definición 2 (Sistema no lineal) (Ogata, 2010). Un sistema es no lineal si no es posible aplicarle el principio de superposición.

Sin pérdida de generalidad, un sistema no lineal puede ser representado mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)], \quad \forall t \geq 0, \quad (1.3)$$

en el cual, $t \in \mathbb{R}^+$ denota el tiempo, $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ es el vector de las variables de estado en un tiempo t , y $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ corresponde a las entradas de control del sistema.

1.4.1. Ejemplos de Sistemas no lineales controlados

La teoría de control automático, ha experimentado un notable desarrollo en los últimos tiempos, especialmente en el campo de los sistemas no lineales. Este tipo de sistemas permiten reflejar de mejor manera la realidad física de su comportamiento y se pueden encontrar en muchas áreas de la industria. A continuación se dan algunos ejemplos de ellos.

1.4.1.1. Generación de energía

La utilización de calderas industriales (Morilla, 2012) cuya función es suministrar vapor de una determinada calidad (temperatura y presión),

para generar energía tomando en cuenta muchas variables que deben ser controladas, como por ejemplo, la relación de aire más combustible en la entrada, mantener el nivel de agua controlado para evitar sobre calentamiento y mantener la relación de agua en la salida.

1.4.1.2. Reactores químicos

Los sistemas no lineales también se encuentran presentes en la industria química, donde se realizan procesos biotecnológicos a través del control de bioreactores. De los cuales se muestran tres casos a continuación:

1.4.1.3. Reactor para convertir metilciclopentano a benceno

Es un reactor tipo tubular con un comportamiento no lineal y ha sido propuesto por Luus (2000, 2008). Este reactor tiene como objetivo maximizar la conversión de metilciclopentano a benceno y cuya aplicación está en la industria química, en la industria farmacéutica, en la industria de los detergentes y en el desarrollo de procesos a partir del petróleo, entre otros.

1.4.1.4. Bioreactor de Cholette

El bioreactor de Cholette es un reactor de tipo tanque agitado continuo (*CSTR*, por sus siglas en inglés) con mezclado no ideal y con un comportamiento dinámico no lineal (Fig. 1.3). Este bioreactor presenta multiplicidad en las concentraciones de flujo de alimentación, concentración de sustrato y de salida, debido a que posee estados estacionarios estables e inestables y es un sistema de una entrada y una salida (SISO, por sus siglas en inglés). Algunos estados estacionarios estables e inestables son los que se presentan en la tabla 1.2 (Chidambaram y Reddy (1996) y Carrillo-Ahumada y cols. (2014)).

Su comportamiento dinámico es descrito por la siguientes ecuaciones:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{nq}{mV}(c_f - c) - \frac{k_1 c}{(1 + k_2 c)^2} \quad (1.4)$$

$$c_e = nc + (1 - n)c_f \quad (1.5)$$

donde, la ecuación diferencial (1.4) representa el balance de masa para la concentración de sustrato (c) en el bioreactor con una mezcla no ideal y el término $[-\frac{k_1}{(1+k_2c)^2}]$ indica la forma de la velocidad de reacción. En tanto que la ec. (1.5) representa la concentración de sustrato en la salida del bioreactor. Se considera que todos los parámetros del modelo y las propiedades físico-químicas son constantes y que la reacción se produce en un CSTR con una

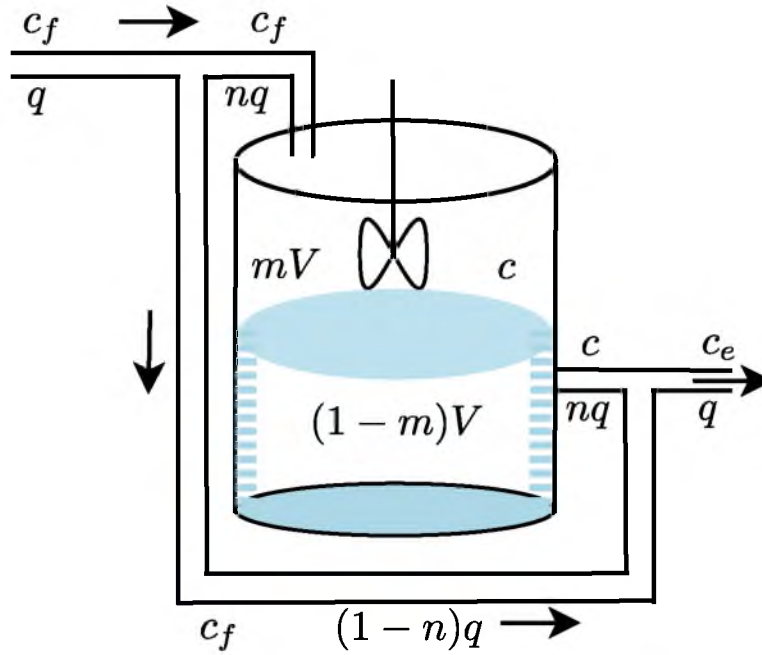


Figura 1.3: Representación esquemática del bioreactor de Cholette propuesto por Chidambaram y Reddy (1996).

mezcla no ideal operado bajo condiciones isotérmicas (Ibarra-Junquera y Rosu (2007)), cuya utilidad industrial se encuentra en reacciones catalíticas. El significado de los parámetros de las ecuaciones se describen en la Tabla 1.1.

Símbolo	Significado	Unidades
q	Flujo de alimentación	$m^3 s^{-1}$
c_f	Concentración en la entrada	$kg\ mol\ m^{-3}$
c	Concentración en la zona de mezcla	$kg\ mol\ m^{-3}$
c_e	Concentración de salida	$kg\ mol\ m^{-3}$
n	Fracción de alimentación del reactivo	sin dimensiones
m	Fracción del volumen total del reactor	sin dimensiones
k_1	Máxima velocidad cinética	s^{-1}
k_2	Parámetro de inhibición	$m^3\ kg\ mol^{-1}$
V	Volumen	m^3

Tabla 1.1: Parámetros de las variables de estado del bioreactor de Cholette (Chidambaram y Reddy, 1996).

La dinámica de este reactor es muy variada por que presenta multiplicidad de estados estacionarios. Cada estado estacionario tiene un nivel de estabilidad diferente entre cada uno de ellos. Además, la dinámica lineal

puede ser representada por diferentes modelos (Tabla 1.2) y la dinámica no lineal por las Ecs. 1.4 y 1.5 (en algunos casos es suficiente con la Ec. 1.4).

Generalmente en la literatura relacionada al estudio de la dinámica del reactor de Cholette, se consideran como variables c_f y q (señal de control y entrada exógena respectivamente) los cuales proporcionan variaciones en c y en c_e . Por ejemplo, la dinámica en el estado estacionario $c_s = 1.303 \text{ kg mol m}^{-3}$, $q_s = 3.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $c_{f_s} = 3.28 \text{ kg mol m}^{-3}$ (utilizado en este trabajo de investigación) puede ser observada con las siguientes pruebas:

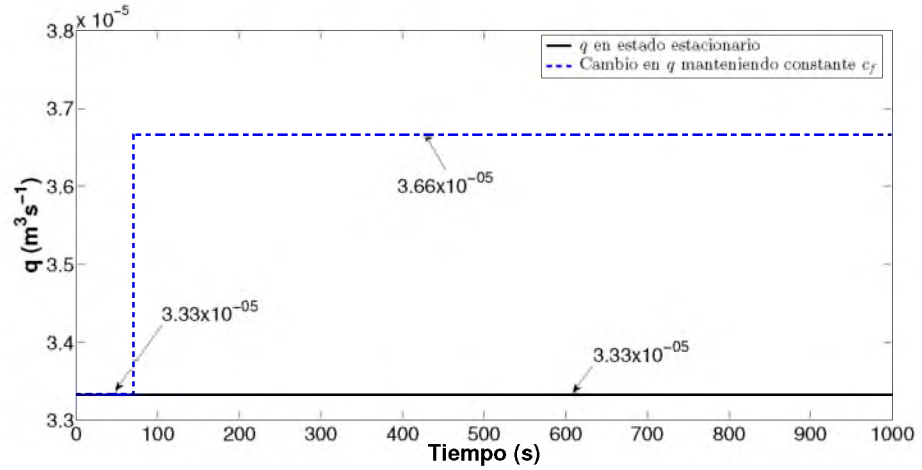


Figura 1.4: Cambio en q de $3.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $3.66 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ manteniendo constante $c_f = 3.28 \text{ kg mol m}^{-3}$.

Las pruebas mostradas en las Figs. 1.4 y 1.5 repercuten en la dinámica no lineal de la concentración de sustrato (Ec. 1.4) y de la concentración de salida del bioreactor (Ec. 1.5) como se muestra en las Figuras 1.6 y 1.7 respectivamente.

Por lo tanto, se observa que la dinámica no lineal del bioreactor de Cholette en el estado estacionario $c_s = 1.303 \text{ kg mol m}^{-3}$, $q_s = 3.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $c_{f_s} = 3.28 \text{ kg mol m}^{-3}$ es inestable. En este estado estacionario, cuando $t > 400 \text{ s}$, la concentración de sustrato (c) cambia de $1.302 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $0.0142 \text{ kg mol m}^{-3}$, de manera semejante para la concentración de salida (c_e) cambia de $1.8 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $0.83 \text{ kg mol m}^{-3}$.

Cuando existen variaciones de q y c_f , la dinámica de c y c_e es diferente al estado estacionario. Cuando existe variación de q , el valor de c cambia

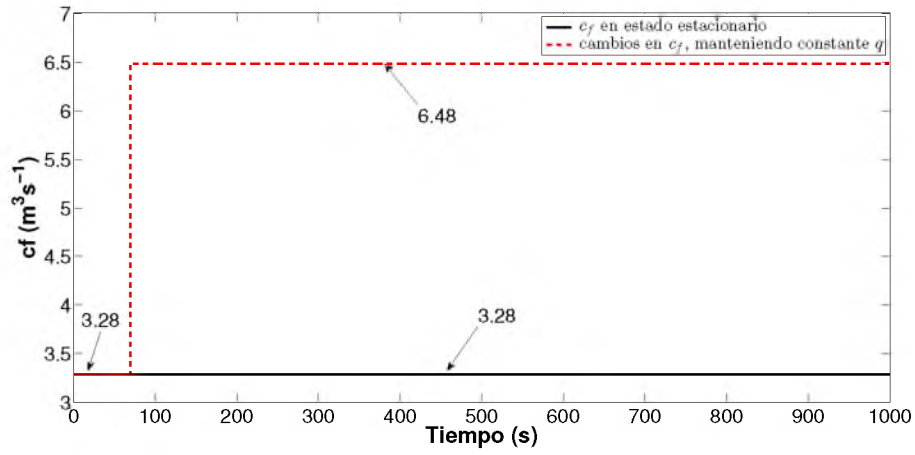


Figura 1.5: Cambio en c_f de $3.28 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $6.4843.28 \text{ kg mol m}^{-3}$ manteniendo constante $q = 3.33 \times 10^{-05} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

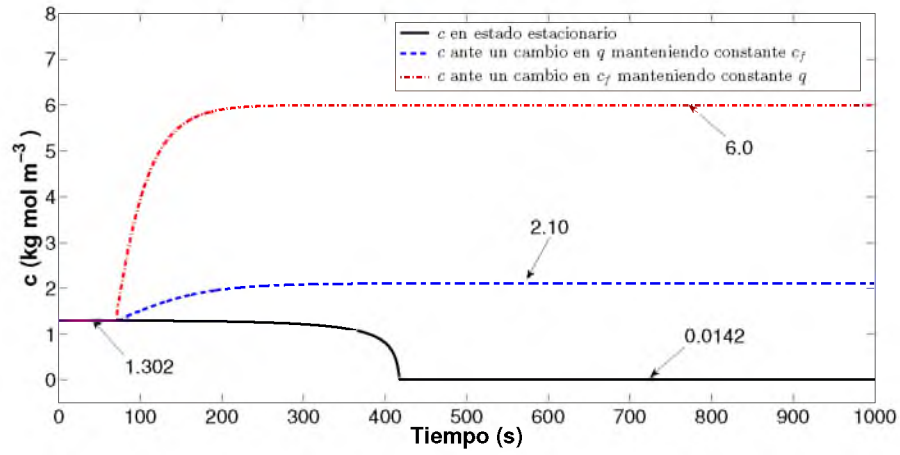


Figura 1.6: Dinámica no lineal de c ante cambios en q y c_f mostrados en las figuras 1.4 y 1.5.

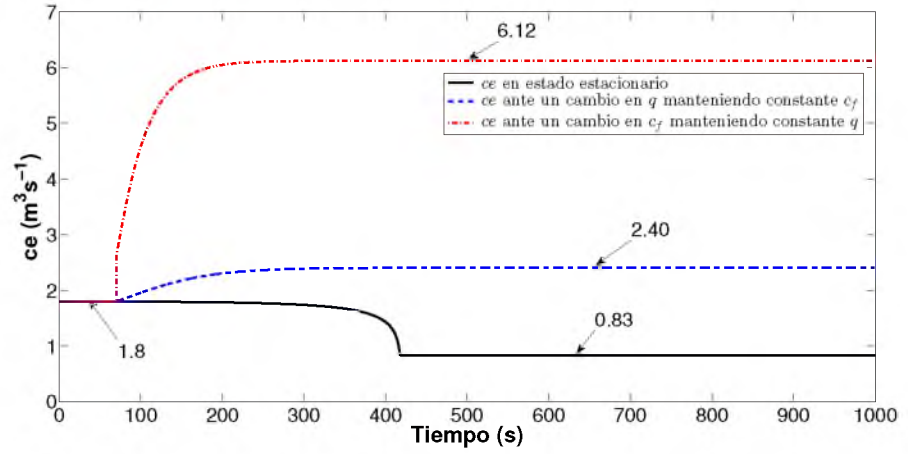


Figura 1.7: Dinámica no lineal de c_e ante cambios en q y c_f mostrados en las figuras 1.4 y 1.5.

de $1.302 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $2.10 \text{ kg mol m}^{-3}$ y c_e varía de $1.8 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $2.40 \text{ kg mol m}^{-3}$. Por otro lado, cuando existe variación de c_f , el valor de c cambia de $1.302 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $6.0 \text{ kg mol m}^{-3}$ y c_e varía de $1.8 \text{ kg mol m}^{-3}$ a $6.12 \text{ kg mol m}^{-3}$ alcanzando otros estados estacionarios. Un análisis más profundo de la dinámica de este sistema es mostrado en Carrillo-Ahumada y cols. (2014).

Las características propias del comportamiento de este bioreactor ha generado gran interés por la comunidad académica que han establecido diferentes estrategias de control. Como se muestra en la Tabla 1.2.

Modelo	Estado		Parámetros	Estructura de Control									Referencia
	Estable	Inestable		I	LPD	PI	PwI	PID	PIDn	PwID	PwI-Dy	PSC	
1) $G(s) = \frac{0.2341s+0.2734}{(1+0.04s-1)}$	✓		$c_s = 0.05867, c_{fs} = 7.024, c_e = 1.8$	✓									Chidambaram y Reddy (1996)
2) $G(s) = \frac{1.1210s}{33.636s-1}e^{-10s}$		✓	$c_s = 1.0439, c_{fs} = 3.288$					✓					Huang y Chen (1999)
								✓					Jhunjhunwala y Chidambaram (2001)
								✓					Reynoso-Meza y cols. (2016)
3) $G(s) = \frac{2.21(1+11.133s)}{98.3s-1}e^{-20s}$		✓	$c_s = 1.304, c_{fs} = 3.288, c_{es} = 1.8$					✓					Huang y Chen (1999)
									✓				Padma y Chidambaram (2002)
					✓								Rajinikanth y Latha (2012b)
4) $G(s) = \frac{3.3226}{99.69s-1}e^{-20s}$		✓	$c_s = 1.3065, c_{fs} = 3.288$								✓		Padma y Chidambaram (2005)
									✓				Rajinikanth y Latha (2012a)
								✓					SivaramaKrishnan y Tangirala. (2008)
							✓						Sree y Chidambaram (2003a)
5) $G(s) = \frac{-0.1727(1-4.473s)}{8.1s-1}$		✓	$c_s = 0.2383, c_{fs} = 6.484, c_{es} = 1.8$				✓						Carrillo-Ahumada y cols. (2011)
							✓						Ibarra-Junquera y Rosu (2007)
								✓					Márquez-Rubio y del Muro-Cuellar (2010)
6) $G(s) = \frac{3.437}{100.1s-1}e^{-20s}$		✓	$c_s = 1.316, c_{fs} = 3.288$					✓					Normey-Rico y Camacho (2009)
								✓					Seshagiri, Rao, y Chidambaram (2007)
													Ajmeri y Ali (2015)
												✓	

P: proporcional, I: integral, D: derivativa, w: peso de los parámetros, n: filtro, y: salida, PSC: Estructura de control paralela.

Tabla 1.2: Revisión de modelos y controladores para el bioreactor de Cholette.

Los autores mencionados en la Tabla 1.2, han utilizado diferentes estructuras de control y diferentes métodos de sintonización de controladores, por ejemplo, Chidambaram y Reddy (1996) utiliza una estructura de control Integral (I), (Ec. 1.6) (modelo 1) aplicado en un estado estable cuyos parámetros, son la concentración de sustrato ($c = 0.05867$) y la concentración de alimentación ($c_f = 7.024$).

$$U(s) = \frac{K_i}{s} E(s) \quad (1.6)$$

donde, $U(s)$ es la señal de control y $E(s)$ es la señal de error.

Huang y Chen (1999), Jhunjhunwala y Chidambaram (2001), Reynoso-Meza y cols. (2016), han utilizado una estructura de control Proporcional-Integral-Derivativa, (Ec. 1.7), aplicado a un estado inestable con una concentración de sustrato ($c = 1.304$) y una concentración de alimentación de ($c_f = 3.288$), (Tabla 1.2, modelo 2). De igual manera SivaramaKrishnan y Tangirla. (2008) aplica la misma estructura de control PID (Ec. 1.7), pero lo aplica en un estado diferente utilizando una concentración de sustrato ($c = 1.3065$) y una concentración de alimentación ($c_f = 3.288$). (Tabla 1.2, modelo 4)

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.7)$$

donde, $U(s)$ es la señal de control, K_p es la ganancia proporcional, T_i y T_d son el tiempo integral y tiempo derivativo respectivamente.

Huang y Chen (1999), Sree y Chidambaram (2003a), Carrillo-Ahumada y cols. (2011), Márquez-Rubio y del Muro-Cuéllar (2010), Normey-Rico y Camacho (2009), Seshagiri y cols. (2007), han utilizado una estructura de Control (Proporcional-Integral con ponderación (PwI)), (Ec. 1.8) aplicado a un estado inestable, como se muestra en la (Tabla 1.2, modelos 3, 5 y 6).

$$U(s) = \left(K_p w + \frac{K_i}{s} \right) R(s) - \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) Y(s) \quad (1.8)$$

donde, $U(s)$ corresponde a la señal de control, k_p es la ganancia proporcional, w es el parámetro de ponderación, K_i es la ganancia integral, $R(S)$ corresponde al setpoint y $Y(S)$ corresponde a la salida medida.

Se puede observar también que Huang y Chen (1999) aplicaron una estructura de control PwI a un estado, cuya concentración de sustrato ($c = 1.304$) y concentración de alimentación ($c_f = 3.288$), (Tabla 1.2, modelo 3). Mientras que Sree y Chidambaram (2003a), Carrillo-Ahumada y cols.

(2011), aunque utilizaron la misma estructura de control (PwI), ellos lo aplicaron otro estado diferente, también inestable, cuya concentración de sustrato ($c = 0.2383$) y concentración de alimentación ($c_f = 6.484$), (Tabla 1.2, modelo 5).

Márquez-Rubio y del Muro-Cuéllar (2010), Normey-Rico y Camacho (2009), Seshagiri y cols. (2007), ellos también utilizaron una estructura de control Proporcional con parámetro de ponderación en el setpoint (Ec. 1.8) pero aplicado a un estado inestable diferente, con una concentración de sustrato ($c = 1.316$) y una concentración de alimentación ($c_f = 3.288$) (Tabla 1.2, modelo 6).

Ibarra-Junquera y Rosu (2007) aplicaron una estructura de control - Proporcional-Integral (PI) (Ec. 1.9), a un estado inestable como se puede observar en la tabla (Tabla 1.2, modelo 5), éste estado tiene una concentración de sustrato ($c = 0.2383$) y una concentración de alimentación ($c_f = 6.484$).

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (1.9)$$

donde, $U(s)$ corresponde a la señal de control, $E(s)$ es el error.

Padma y Chidambaram (2002), utilizan una estructura de control proporcional, integral y derivativo con filtro del error Proporcional-Integral-Derivativo con filtro (PIDn) (Ec. 1.10) aplicado a un estado inestable con una concentración de sustrato ($c = 1.304$) y una concentración de alimentación ($C_f = 3.288$) (Tabla 1.2, modelo 3). De igual manera Rajinikanth y Latha (2012a), aplica la misma estructura de control (Ec. 1.10), pero con diferente concentración de sustrato ($c = 1.3065$) y una concentración de alimentación ($c_f = 3.288$) (Tabla 1.2, modelo 4).

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\frac{K_d s}{N} + 1} \right) R(s) - \left(K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{\frac{K_d s}{N} + 1} \right) Y(s) \quad (1.10)$$

donde, $U(s)$ es la señal de control, $R(s)$ es el setpoint, $Y(s)$ es la salida medida, $K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$ y $K_d = K_p \tau_d$.

Rajinikanth y Latha (2012b), utiliza una estructura de control integral, proporcional-derivativo con ponderación en el setpoint (I-PD), (Ec. 1.11) aplicado a un estado inestable, con una concentración de sustrato ($c = 1.304$) y concentración de alimentación ($c_f = 3.288$) (Tabla 1.2, modelo 3).

$$U(s) = \left(\frac{K_i}{s} \right) R(s) - (K_p + K_d s) Y(s) \quad (1.11)$$

donde, $U(s)$ es la señal de control, $R(s)$ es el setpoint, $Y(s)$ es la salida medida.

Padma y Chidambaram (2005), aplica una estructura de control proporcional con parámetro de ponderación, integral del error, menos la derivada de la salida (PwIDy) (Ec. 1.12) con una concentración de sustrato ($c = 1.3065$) y concentración de alimentación ($c_f = 3.288$) (Tabla 1.2, modelo 4).

$$U(s) = \left(K_p w + \frac{K_i}{s}\right)R(s) - \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right)Y(s) \quad (1.12)$$

Ajmeri y Ali (2015), utiliza una estructura de control Paralela (PSC), (Tabla 1.2, modelo 6), (Fig. 1.8), donde G_m es el modelo nominal, G_p es el proceso a controlar, G_{c1} y G_{c2} son los controladores respectivamente, U_1 y U_2 son las señales de control R es el setpoint, D es la entrada de perturbación y Y es la salida

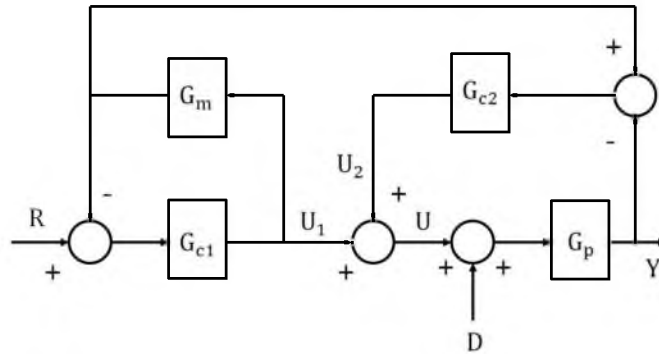


Figura 1.8: Representación de una estructura de control Paralela (PSC).

Después de que son establecidas diferentes estructuras de control para la solución de cualquier sistema de estudio, es necesario también establecer algunas medidas cuantitativas que permitan evaluar el desempeño de tales sistemas.

1.5. Evaluación de sistemas lineales y no lineales controlados en dominio del tiempo

El uso del control automático para procesos en plantas industriales, en la actualidad es una actividad cotidiana. Por lo cual, el control aplicado a

1.5. Evaluación de sistemas lineales y no lineales controlados en dominio del tiempo

dichos procesos, no solamente debe proporcionar estabilidad si no también es importante medir, evaluar y comparar el desempeño del sistema. Para ello, se han desarrollado medidas de desempeño (métricas) que permiten cuantificar la calidad de respuesta del sistema controlado. Esta medida le permitirá al DM o ingeniero de control decidir si se acepta o se rechaza el diseño del sistema.

De acuerdo con [Schultz y Rideout \(1961\)](#) las primeras medidas de desempeño datan aproximadamente de 1942 y corresponden a los índices ya conocidos: Integral del valor absoluto del error IAE, Integral del valor absoluto del error ponderada por el tiempo ITAE, Integral del cuadrado del error ISE, Integral del cuadrado del error ponderado por el tiempo ITSE, Integral de la variación total del Control TVU, sólo por mencionar algunos. Estos índices indican diferentes métricas del desempeño del sistema controlado. En la [Tabla 1.3](#) se muestra una recopilación más completa (aunque es conveniente mencionar que pueden existir otros).

Como se puede observar también en la misma tabla, sería complicado seleccionar un índice en específico que pueda medir todas las características que el DM necesite.

De cualquier manera, el índice de desempeño que sea seleccionado permitirá llevar a cabo un análisis matemático estableciendo una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba y la capacidad del sistema de manejar las señales de entrada reales ([Ogata, 2010](#)).

Para este trabajo en particular, se ha elegido; la Integral del cuadrado del error multiplicado por el tiempo (ITSE) y la variación total del Control (TVU), debido que son fáciles de implementar e interpretar con el sistema lineal, con el sistema no lineal y son resueltos numéricamente. El análisis que se lleva a cabo para los dos índices; es cuando existe un cambio inesperado en la entrada exógena (escenario regulatorio) y cuando ocurre un cambio inesperado en la entrada de referencia (escenario servo).

Tabla 1.3: Índices de desempeño para los escenarios servo/regulatorio
Ogata (2010), Shabani, Vahidi, y Ebrahimpour (2013), Kroll y Schulte (2014)

Nombre	Expresión matemática
Tiempo pico	$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$
Sobrepaso (sobreelongación)	$M_p = e^{-(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}})\pi}$
Tiempo de asentamiento	$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$
Integral del valor absoluto del error	$IAE = \int_0^N e(t) dt$
Integral del valor absoluto del error ponderada por el tiempo	$ITAE = \int_0^N t e(t) dt$
Integral del cuadrado del error	$ISE = \int_0^N e^2(t)dt$
Integral del cuadrado del error ponderado por el tiempo	$ITSE = \int_0^N t.e^2(t)dt$
Integral del cuadrado del control	$ISU = \sum_{k=0}^N (u(k) * u(k))$
Integral del cuadrado del control	$ISU_2 = \sum_{k=0}^N (u(k) - u_{ss})^2$
Integral de la variación total del control	$TVU = \sum_{k=1}^N u(k) - u_{(k-1)} $
Máximo porcentaje de sobresalto	$J_{PO} = \frac{\max_{1 \leq k \leq N} (y(k) - y_{ss})}{y_{ss}} .100 \%$
Máximo porcentaje de bajosalto	$J_{PU} = \frac{\max_{1 \leq k \leq N} (-y(k))}{y_{ss}} .100 \%$
Máximo error absoluto	$JMAE_{Ref} = Jmax = \max_{1 \leq k \leq N} r(k) - y_r(k) $
Media del cuadrado del error	$JMSE_{Ref} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (r(k) - y_r(k))^2$
Media de la raíz cuadrada del error	$JRMSE_{Ref} = \sqrt{JMSE_{Ref}}$
Pico del esfuerzo de control	$Jpeak_u = \max_{1 \leq k \leq N} u(k) $
Integral del cuadrado de la acción de control	$J_{ISU} = \sum_{k=1}^N (u(k) - \bar{u})^2, \quad \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(k)$
Sobresalto de la variable manipulada	$JOS_u = \max_{1 \leq k \leq N} u(k) - u_{ss} $

Capítulo 2

Optimización

2.1. Introducción

El diseño o fabricación de algún producto, tiene como objetivo principal cumplir al máximo con los requerimientos para los cuales fue diseñado o fabricado. Para ello, de manera implícita, se ha lleva a cabo un proceso de optimización. Por lo anterior, se puede afirmar que la optimización es y ha sido parte de nuestra vida cotidiana.

En muchas ocasiones el planteamiento del proceso de optimización se hace de forma manual, por consiguiente, se invierte demasiado tiempo ya que implica un estudio paso a paso para la identificación correcta de los parámetros asociados a la mejor solución (Roy, Hinduja, y Teti, 2008).

Pero en el campo de la industria, el escenario de optimización se vuelve más complicado. Por ejemplo, para diseñar o fabricar productos de alta calidad a un costo mínimo, se necesitan técnicas que puedan encontrar aquellos parámetros que cumplan con los requisitos generalmente especificados por objetivos (funciones de objetivo) al comienzo del proceso de diseño. Dichas funciones objetivo son formuladas mediante expresiones matemáticas y generalmente representan una medida cuantitativa que permite evaluar la calidad producto.

Los problemas de optimización de parámetros, se encuentran presentes en muchas áreas de la ciencia (física, economía, biología, química, ingeniería, cómputo, sólo por mencionar algunas). Ya sea en la creación de un nuevo producto, en la minimización de errores de operación, en el mejoramiento algún proceso, en el diseño de suspensión de vehículos, en diseño de estructuras en alas de aviones, en sistemas de enfriamiento de turbinas, control de bioreactores, en la maximización de ganancias minimizando los costos, entre otros.

Por lo anterior, es complicado proporcionar una definición exacta, dado que la optimización está presente en muchas áreas como se ha mencionado en el párrafo previo, pero lo que sí es un hecho, es que mediante optimización se asegura que la búsqueda se realice de la manera más eficiente posible.

Una definición más formal aplicada al área de ingeniería se proporciona a continuación.

Definición 3 Optimización (Messac, 2015). La optimización, es el proceso de maximizar y / o minimizar uno o más objetivos sin violar restricciones de diseño específicas, mediante la regulación de un conjunto de parámetros variables que influyen tanto en los objetivos como en las restricciones del diseño.

En su mayoría, muchos de los problemas reales de ingeniería tienen múltiples objetivos. Esto significa que necesitan cumplir con diferentes requerimientos al mismo tiempo, por consiguiente, para este tipo de problemas, es necesario un enfoque de optimización multiobjetivo.

El uso de la optimización multiobjetivo está motivado por la necesidad de optimizar al mismo tiempo varias medidas de rendimiento al diseñar algún objeto o al optimizar algún proceso industrial. Estas medidas de rendimiento describen las propiedades deseables por el diseñador (Weise, 2009).

Las diversas funciones objetivo y restricciones asociadas expresan los requerimientos del diseño en forma directa. Así que el diseñador define la manera de como expresar la solución o soluciones de las diferentes funciones objetivo.

2.2. Optimización Multiobjetivo (MOO)

De acuerdo con (Mattson y Messac (2005), Marler y Arora (2004)), la optimización multiobjetivo puede llevarse a cabo mediante dos enfoques:

El primer enfoque (Fig. 2.1), consiste en abordar el MOP como una sola función compuesta, en la que se agrupan todos los objetivos. A dicho enfoque también se le conoce como función de agregación (*Aggregate Objective Function, AOF*) (Messac y Mattson, 2002). Esto significa que el problema puede ser resuelto mediante métodos de ponderación (Marler y Arora, 2004) en los que el DM establece preferencias *a priori* que expresan la relación (cuantificación) e importancia entre los diferentes objetivos involucrados, antes de llevar a cabo el proceso de optimización e indicando así la importancia de

2.2. Optimización Multiobjetivo (MOO)

cada uno de ellos. Posterior al proceso de optimización se obtiene una única solución y ésta se toma como solución óptima a implementar.

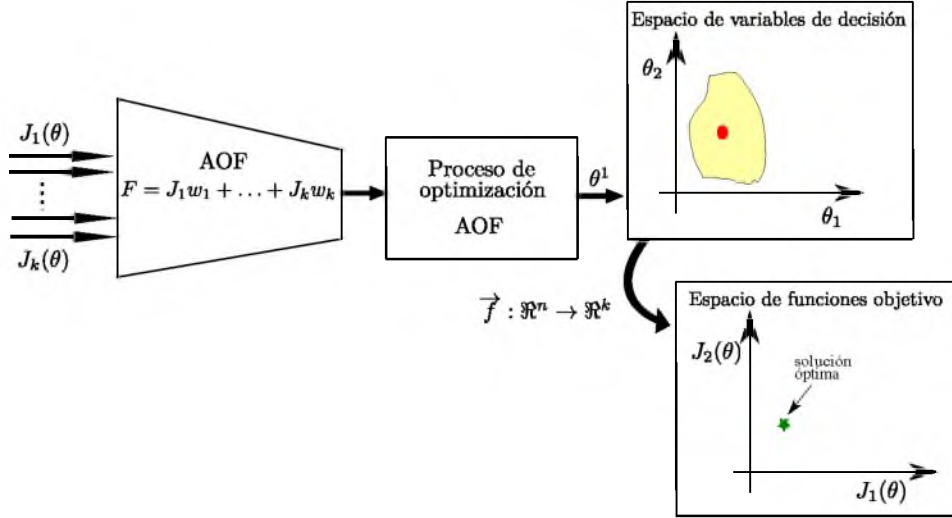


Figura 2.1: Enfoque de resolución de un problema multiobjetivo, mediante AOF.

Obtener una solución adecuada y en equilibrio entre todos los objetivos involucrados depende en gran medida de una selección o combinación correcta de los coeficientes de ponderación. Tornándose esta tarea más complicada cuando el número de funciones objetivo se incrementa (Miettinen, 1999). Como se ha mencionado anteriormente, en este enfoque, solo es posible obtener una única solución óptima y se toma como válida.

Un ejemplo de éste caso se puede observar en (Aguila-Camacho y Duarte-Mermoud (2013), Uddin, Mekhilef, Rivera, y Rodriguez (2015)) donde se lleva a cabo un proceso de ponderación aplicado a la función de coste utilizando AOF como técnica para obtener la solución óptima.

El segundo enfoque (Fig. 2.2), consiste en generar de inicio un conjunto de soluciones óptimas para posteriormente elegir alguna de ellas. A dicho enfoque se le conoce como (*Generate First Choose Later, GFCL*) (Messac y Mattson, 2002). Esto significa que se va a generar primero todo un conjunto soluciones óptimas y no dominadas entre sí mediante algún método de optimización, como por ejemplo, mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo (*MultiObjective Evolutionary Algorithms* , *MOEAs*) (Coello y Lamont,

2004). Toda vez que se ha generado dicho conjunto de soluciones óptimas (mencionadas anteriormente), será hasta entonces que el DM tendrá la oportunidad de analizar y establecer preferencias para elegir la solución que mejor cumpla con sus requerimientos. Es por ello que en este enfoque GFCL, se dice que establecen las preferencias *a posteriori* (Marler y Arora, 2004).

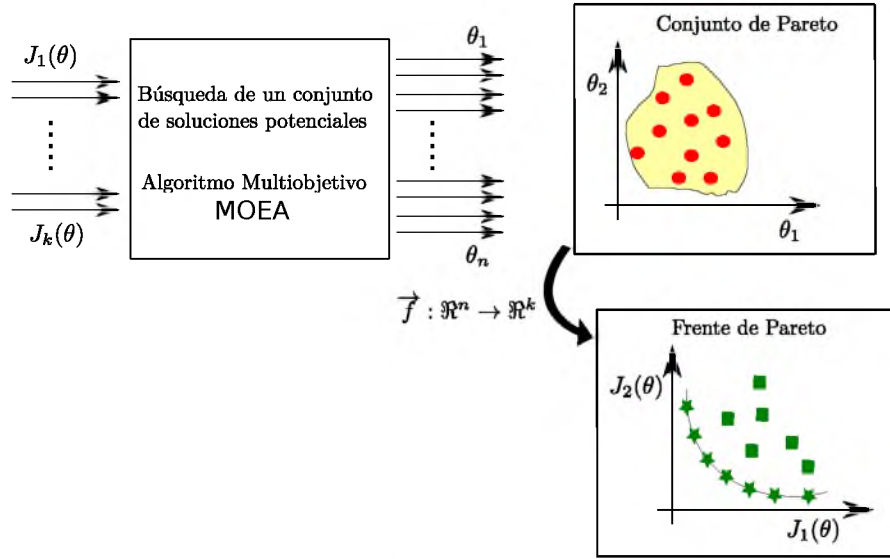


Figura 2.2: Enfoque de resolución de un problema multiobjetivo mediante GFCL.

En el argot de optimización multiobjetivo, al conjunto de soluciones óptimas se les conoce como Pareto óptimas o conjunto de Pareto (*Pareto Set*, P_s) y su proyección al espacio de objetivos se le conoce como frente de Pareto (*Pareto Front*, P_f). El proceso de elegir una solución en GFCL no es una tarea fácil, para ello se lleva a cabo un proceso de decisión multicriterio, debido a que todas las soluciones son óptimas (ninguna solución es mejor que otra), si no más bien, cada una representa un grado de compromiso diferente entre todos los objetivos, como se mencionó anteriormente.

Por lo anterior un MOP, es aquel que tiene dos o más objetivos que deben ser satisfechos de manera simultánea y por lo general estos se encuentran en conflicto entre sí, ya que al mejorar uno de ellos puede conducir al empeoramiento de otro objetivo, como lo menciona Deb (2001).

Al proceso de optimizar un conjunto de objetivos (funciones) se le conoce como optimización multi-objetivo (*Multiobjective Optimization*, *MOO*) y ello se traduce en que se desea minimizar/maximizar de manera simultánea todas las funciones objetivos del sistema que son relevantes y apropiadas

para el diseñador (Miettinen, 1999).

Por lo anterior, es común que un problema con múltiples objetivos sea planteado como un problema de optimización.

2.2.1. Planteamiento de un problema de optimización multi-objetivo

Sin pérdida de generalidad, un problema multi-objetivo consiste en minimizar¹ k objetivos, todos ellos de igual importancia para el diseñador. Por lo que, el resultado que se espera obtener es un conjunto de soluciones óptimas que sólo se diferencian entre sí por el grado de compromiso entre ellas.

Utilizando notación matemática, un MOP puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = [J_1(\boldsymbol{\theta}), J_2(\boldsymbol{\theta}), \dots, J_k(\boldsymbol{\theta})] \quad (2.1)$$

sujeito a:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) \leq 0 \quad (2.2)$$

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}) = 0 \quad (2.3)$$

$$\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \overline{\theta}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

donde, $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathfrak{R}^k$ es el vector de las funciones objetivo, $\boldsymbol{\theta} \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de variables de decisión y pertenece a la región factible, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta})$ el vector de restricciones de desigualdad, $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta})$ el vector de restricciones de igualdad y $\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \overline{\theta}_i$, con $i = [1, \dots, n]$ es el intervalo de búsqueda en el espacio de decisión.

En presencia de múltiples soluciones óptimas, es difícil elegir una solución de manera visual o cualitativa, por lo que es necesario, establecer un mecanismo cuantitativo que permita diferenciar cuando una solución (establecer alguna base, para decidir si una solución domina a otra o no) es mejor que otra, para ello se establecen las siguientes definiciones.

Definición 4 *Optimalidad de Pareto* (Miettinen, 1999). Un vector objetivo $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^1)$ es óptimo de Pareto, si no hay otro vector objetivo $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^2)$ tal que $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^2) \leq \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^1)$ para todo $i \in [1, 2, \dots, k]$ y $J_j(\boldsymbol{\theta}^2) < J_j(\boldsymbol{\theta}^1)$ para al menos una $p, p \in [1, 2, \dots, k]$.

¹Un problema de minimización, puede ser convertido en uno de maximización para cada uno de los objetivos, al plantearse de la siguiente forma: $\arg \min J_i(\theta) = \arg \max(-J_i(\theta))$.

Definición 5 Dominancia (Miettinen, 1999). Un vector objetivo $J(\theta^1)$ domina a otro vector $J(\theta^2)$ si $J(\theta^1)$ no es peor que $J(\theta^2)$ en todos los objetivos y es mejor en al menos un objetivo, es decir $J(\theta^1) \prec J(\theta^2)$ para todo $i \in [1, 2, \dots, k]$.

En la Figura 2.3 se describen las definiciones anteriores. Por ejemplo, se observa que $J(\theta^1)$ es una solución óptima de Pareto y no dominada, debido a que no existe otra solución que la supere (que sea mejor) y tiene además la particularidad de que se encuentra la región factible del frente de Pareto como puede observarse. En cambio las soluciones $J(\theta^2)$ y $J(\theta^3)$ aunque son soluciones que forman parte del frente de Pareto son soluciones no dominadas, estas no forman parte de la región factible como lo es $J(\theta^1)$.

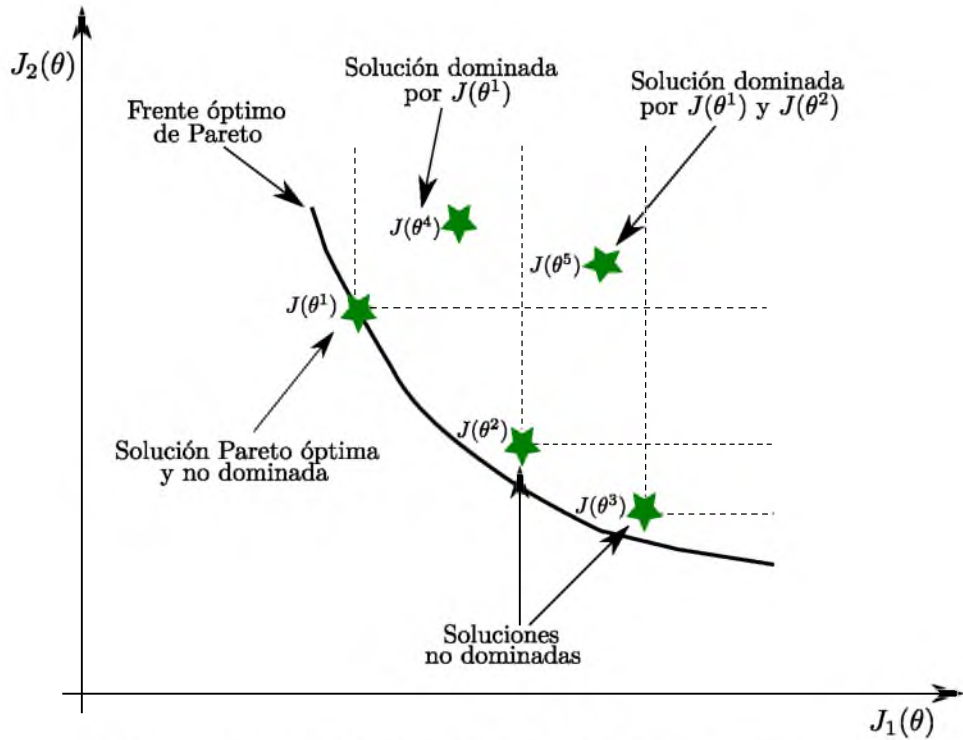


Figura 2.3: Definición de optimalidad de Pareto y dominancia.

Con respecto a $J(\theta^4)$ se observa que es dominada por la solución $J(\theta^1)$ y por lo tanto no se considera como solución Pareto óptima. Ahora con respecto a la solución $J(\theta^5)$ se observa que es dominada tanto por $J(\theta^1)$ como por $J(\theta^2)$ y de igual manera no pertenece a las soluciones Pareto óptimas.

Observando la misma figura, es posible hacer dos clasificaciones importantes de las soluciones. La primera clasificación es en *soluciones no dominadas*

2.3. Optimización mediante Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo

y dentro de ella se encuentran las soluciones $J(\theta^1)$, $J(\theta^2)$ y $J(\theta^3)$. La segunda clasificación en *soluciones dominadas* y dentro de ella se encuentran las soluciones $J(\theta^4)$ y $J(\theta^5)$.

Por las Definiciones 4 y 5 y la descripción anterior, es claro que en la optimización multiobjetivo la tarea más importante es encontrar la mayor cantidad posible de soluciones que sean Pareto óptimas. Pero también es importante tener en cuenta que habrá ocasiones en las que el frente de Pareto es desconocido y sólo se confiará en las aproximaciones de éste.

En el caso cuando se tienen que optimizar (maximizar o minimizar) múltiples objetivos y que regularmente se encuentran en conflicto se pueden utilizar diferentes técnicas de optimización. Una de las técnicas que ha venido cobrando fuerza son los algoritmos evolutivos multiobjetivo, debido a que han demostrado ser una alternativa viable para obtener un conjunto de soluciones Pareto óptimas de manera simultánea (Coello y Lamont, 2004). Es por ello que a continuación se da mayores detalles al respecto.

2.3. Optimización mediante Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, uno de los principales motivos para el uso de los algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA) es que existen problemas complicados donde el comportamiento del sistema sólo puede ser representado por múltiples funciones objetivo, funciones discontinuas, ecuaciones diferenciales no lineales, espacios de búsqueda muy grandes, existen incertidumbres, etc. sólo por mencionar algunos ejemplos. Entonces, debido a la complejidad de estos problemas la optimización no se puede resolver por medio de técnicas convencionales, como lo menciona Caballero y Grossmann (2007) por lo que el ingeniero de control o el diseñador tiene que apoyarse de otras herramientas.

En este sentido los MOEA han demostrado ser una herramienta útil y eficaz para resolver este tipo de problemas mediante búsquedas robustas y mecanismos de optimización que permiten encontrar el máximo o el mínimo de una/varias funciones objetivo, presentando un conjunto de soluciones, todas ellas óptimas, llamado conjunto de Pareto.

Algunos ejemplos de algoritmos Evolutivos Multiobjetivo se dan a continuación : sp-MODE (Reynoso-Meza, Sanchis, Blasco, y Martínez, 2010), MOEA/D (Q. Zhang y Li, 2007), NSGA-II (Deb, Pratap, Agarwal, y Meyarivan, 2002), PAES (Knowles y Corne, 2000), SPEA (Zitzler y Thiele, 1999), NPGA (Horn, Nafpliotis, y Goldberg, 1994), DNMOEA/HI (Li y

cols., 2012), GDE3 (Kukkonen y Lampinen, 2005), etc., sólo mencionar algunos, pero se puede encontrar una gran compendio en Coello, Lamont, y Veldhuizen (2007). Cada uno de éstos MOEA en su proceso de optimización pueden utilizar diferentes metaheurísticas, pero independientemente cual utilicen, éstas tienen la peculiaridad que a partir de una población inicial (conjunto de soluciones potenciales) llevan a cabo un proceso de optimización de manera simultánea (hasta que las condiciones establecidas se cumplan) para todas las funciones objetivo obteniendo así un conjunto de soluciones óptimas en equilibrio (*trade-off*), llamado conjunto de Pareto y su equivalente en el espacio de objetivos, denominado frente de Pareto, como se muestra en la Figura 2.4.

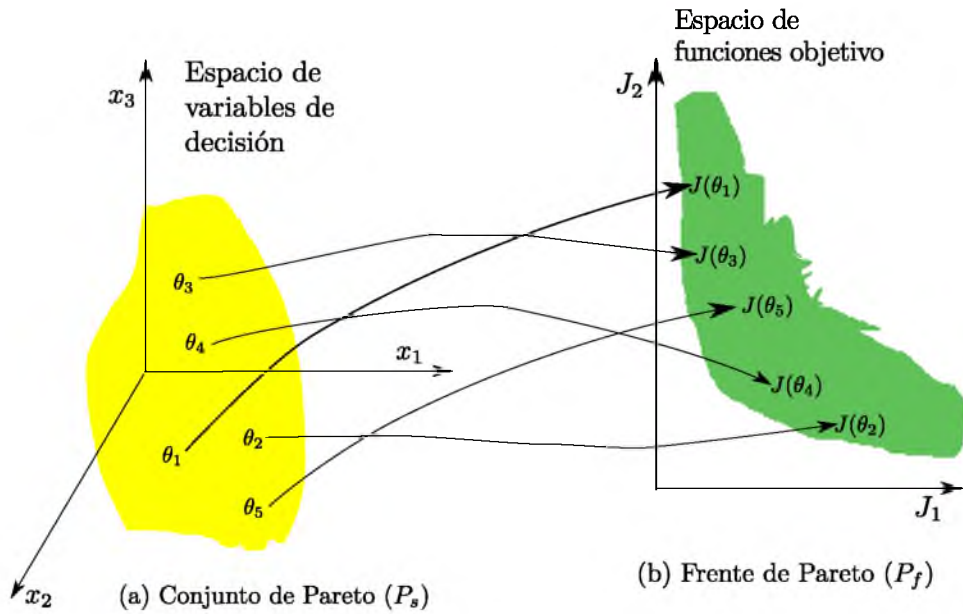


Figura 2.4: Representación del espacio de variables de decisión y su correspondiente espacio de objetivos.

Para llevar a cabo el proceso de optimización mencionado anteriormente, es necesario hacer un estudio previo exhaustivo de las especificaciones, requerimientos y restricciones (múltiples objetivos) del problema.

Muchos investigadores en el campo de la optimización multiobjetivo coinciden que este proceso debe constar de al menos tres etapas muy importantes, de acuerdo con (Coello y cols. (2007), Reynoso-Meza, Blasco, Sanchis, y Martínez (2014), Kasprzyk, Nataraj, Reed, y Lempert (2013)) como se muestra en la Fig. 2.5.

2.3. Optimización mediante Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo

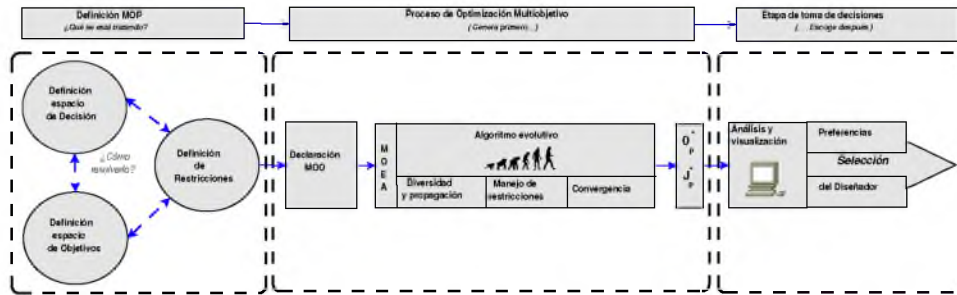


Figura 2.5: Diseño de un problema de optimización multiobjetivo (Reynoso-Meza, García-Nieto, y cols., 2013).

En la primera etapa, se lleva a cabo la definición del problema como multi-objetivo. En esta etapa se definen las variables de decisión, las funciones objetivo y las restricciones del problema. En la segunda etapa se lleva a cabo el proceso de optimización multi-objetivo, mediante un algoritmo evolutivo (*Evolutionary Algorithm, EA*) que se haya elegido, por ejemplo, puede ser: sp-MODE, MOGA, NSGA-II, ϵ -MOEA, etc. y la tercera etapa corresponde a la toma de decisiones multicriterio en la que el responsable de tomar dichas decisiones DM, tendrá que decidir cuáles son las características de las respuestas que deben ser tomadas en cuenta de tal manera que lleve el sistema en estudio a un estado deseado. Esta última etapa es difícil debido a lo complicado que es discriminar la mejor respuesta entre todas las soluciones del frente de Pareto, y como se mencionó con anterioridad todas las soluciones son óptimas, con un mayor o menor grado de compromiso entre ellas.

Aunque las tres etapas son igual de importantes, en la primera de ellas se tiene que ser muy cuidadoso ya que un mal planteamiento en el espacio de decisión, de los objetivos o restricciones, implicaría obtener resultados incorrectos que no reflejarían el estado de control esperado, aún habiendo usado un buen algoritmo de optimización.

Se ha dicho en párrafos anteriores que los algoritmos evolutivos tienen la peculiaridad de generar un gran conjunto potencial de soluciones óptimas, las cuales pueden ser representadas gráficamente utilizando frentes de Pareto, pero al mismo tiempo surgen las siguientes preguntas: ¿cómo o qué mecanismo se puede establecer para elegir la solución que proporcione las mejores prestaciones entre todos los objetivos, si todas las soluciones son óptimas?, ¿cómo se podría establecer preferencias entre todas ellas, para hacer una elección en particular?.

Para ello, es necesario hacer un análisis en el que se tomen en cuenta

todas las prestaciones de los objetivos involucrados, por ello, el DM siempre se apoya de métodos que ayudan a tomar decisiones multi-criterio (*Multiple Criteria Decision Making, MCDM*) (Bonissone, Subbu, y Lizzi, 2009).

Los métodos MCDM le permiten al DM tomar decisiones llevando a cabo un análisis de varios criterios de forma simultánea, estableciendo sus preferencias con el objetivo de evaluar las diferentes alternativas de soluciones que se le presentan.

2.4. Etapa de Toma de Decisiones (MCDM)

Elegir la solución que represente las mejores prestaciones deseadas por el DM, dentro de un gran conjunto de posibles soluciones no siempre es una tarea práctica y sobre todo fácil, debido a que es complicado discriminar entre todas las respuestas proporcionadas en el frente de Pareto.

Ha sido de suma importancia desarrollar nuevos métodos y herramientas que permitan visualizar, comprender e interpretar grandes volúmenes de datos. La "visualización" ha demostrado ser una herramienta muy valiosa y significativa para el DM ya que los datos se transforman en objetos visibles, permitiendo así un mejor entendimiento de las relaciones inherentes entre todos los objetivos y esto permite tomar mejores decisiones.

En este sentido, MCDM es un término empleado en el área de investigación para el uso de métodos que ayudan al Decision Maker (DM) a tomar decisiones de acuerdo a sus preferencias de una forma sistemática y cuantitativa en problemas que se caracterizan por tener múltiples criterios contradictorios (Agrell y Wikner, 1996).

Como se ha mencionado, los métodos MCDM están ligados y se apoyan de herramientas gráficas regularmente, las cuales son de mucha ayuda en el momento del análisis del frente de Pareto. Aunque existen muchas herramientas para éste fin: Diagramas de Dispersión (Moran y Wuhler, 2006), Diagramas de Nivel (Blasco, Herrero, Sanchis, y Martínez, 2008), Coordenadas Paralelas (Inselberg, 1985).

Tomando como ejemplo el trabajo presentado en las *IV Jornadas de Ingeniería en Alimentos* (Torralba-Morales, Reynoso-Meza, García-Alvarado, y Carrillo-Ahumada, 2015). A continuación se da un ejemplo de visualización del mismo frente de Pareto utilizando diagramas de dispersión, coordenadas paralelas y diagramas de nivel. Para el caso de coordenadas paralelas y diagramas de nivel también se muestra como se visualiza el conjunto de Pareto.

- **Diagramas de Dispersión (*Scatter Diagrams*)**. Es un tipo de diagramas de visualización en las cuales se utilizan coordenadas cartesianas $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ para mostrar la correlación y tendencia de dos variables en algún proceso Flott (2012), Wang y cols. (2016), dicha tendencia y correlación se puede observar en las Figs. 2.6 - 2.8. El patrón de sus puntos de intersección muestra gráficamente los patrones de su relación y frecuentemente se usan para probar o también refutar las relaciones de causa y efecto entre las variables.

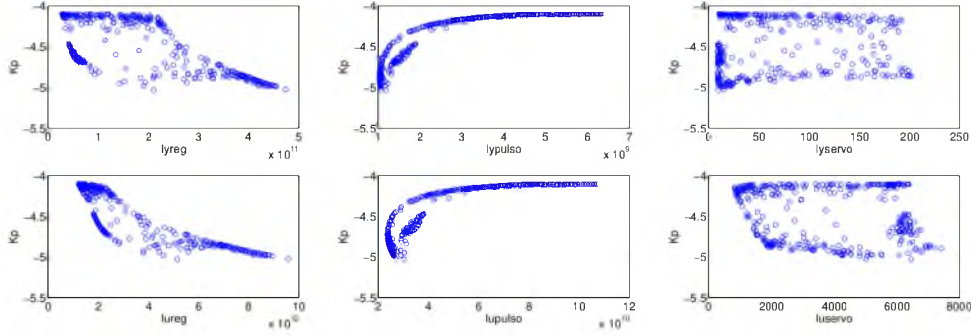


Figura 2.6: Diagramas de Dispersión de índices de desempeño vs k_p .

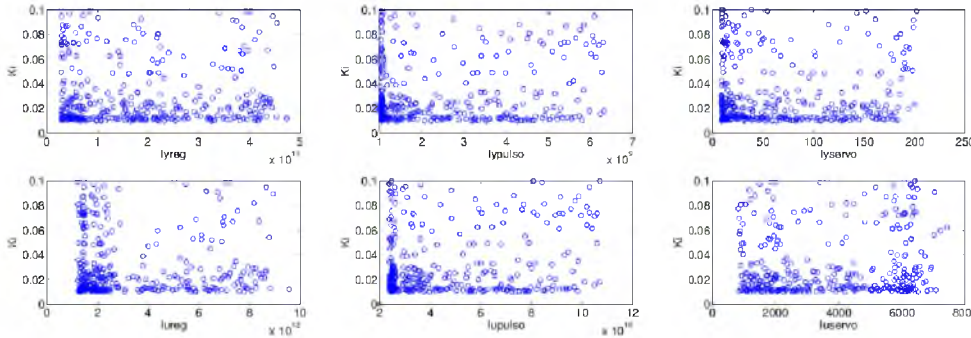


Figura 2.7: Diagramas de Dispersión de índices de desempeño vs. k_i .

En el diseño de sistemas de control, estos diagramas de dispersión se utilizan para visualizar cuales ganancias de control mejoran la calidad de la salida del sistema. Por ejemplo, en Pai, Chang, y Huang (2010), son utilizados para encontrar los valores óptimos de controladores en estructuras PI/PID para el control de calderas industriales, en Banerjee, Chowdhuri, Sarkar, y Bera (2012) se utilizan para comparar el desempeño entre un algoritmo genético y un algoritmo de optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization, (PSO)*) para la optimización de controladores PI y PID.

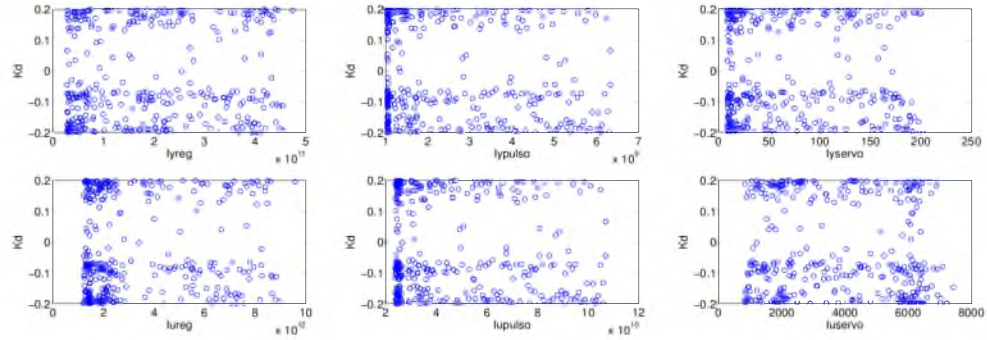


Figura 2.8: Diagramas de Dispersión de índices de desempeño vs. k_d .

- **Coordenadas Paralelas (*Parallel coordinates*)**. Es un método utilizado para la obtención de modelos geométricos de las relaciones de N-variables. Un punto en N-dimensiones, puede ser representado en un plano de dos dimensiones (Inselberg, 1985), como se puede observar en las Figs. 2.9 y 2.10. Esto significa que se tiene la capacidad de mapear de $R^n \rightarrow R^2$.

Además del amplio uso en el control automático, las coordenadas paralelas también son utilizadas en otras aplicaciones, como por ejemplo, para monitoreo de seguridad en Internet, en la visualización gráfica de ataques a servidores (DDoS², por sus siglas en inglés) Choi, Lee, y Kim (2009). En *The National Highway Transportation and Safety Association*, las utilizan para encontrar un equilibrio entre la resistencia interior y exterior de autos ante colisiones (Witowski, Liebscher, y Goel, 2009). En Carrillo-Ahumada y cols. (2015) utilizan las coordenadas paralelas para establecer la relación de índices de desempeño Pareto-óptimo robustos en un helicóptero de 2 grados de libertad y en (García-Nieto, Reynoso-Meza, Borrell, y Penaranda-Foix (2014) y Reynoso-Meza y cols. (2016)) las utilizan para la selección multicriterio del diseño de un sistema de control PID en procesos de sintonización.

²DDoS=Ataque de denegación de servicio distribuido

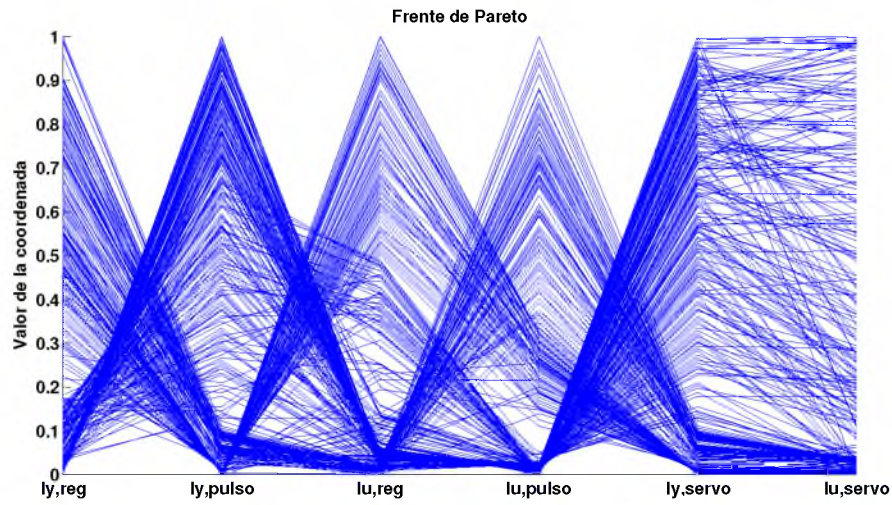


Figura 2.9: Frente de Pareto en coordenadas paralelas.

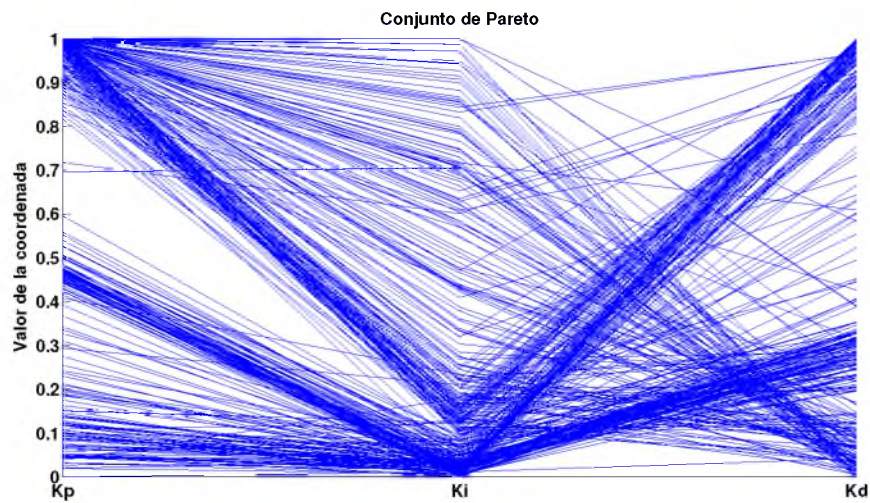


Figura 2.10: Conjunto de Pareto en coordenadas paralelas.

- **Diagramas de Nivel (*Level Diagrams*)**. Los diagramas de nivel son una representación geométrica del conjunto y frente de Pareto los cuales son proporcionados por técnicas de optimización multiobjetivo (Blasco y cols. (2008), Zio y Bazzo (2011), Reynoso-Meza, Sanchis, Blasco, y Martínez (2013), Blasco, Reynoso-Meza, Sánchez, y Sánchez (2016)). Esta herramienta le permite al DM un mejor análisis en la toma mejores decisiones, debido a la capacidad de representar el es-

pacio de decisión y de objetivos simultáneamente (Reynoso-Meza y cols., 2016), entre otras cosas, le permite al DM interactuar con mucha flexibilidad en el momento de elegir una solución estableciendo preferencias, por ejemplo coloreando los puntos que son establecidos como soluciones preferentes, como se muestra en las Figs. 2.11 y 2.12.

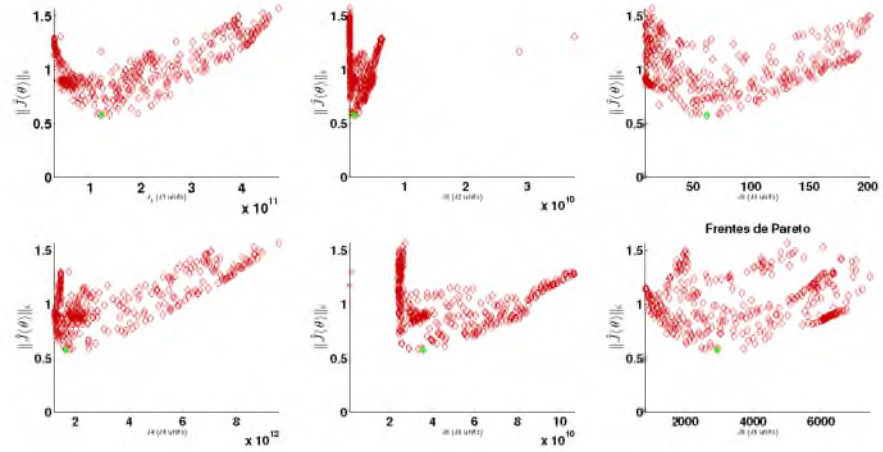


Figura 2.11: Frente de Pareto en Diagramas de Nivel.

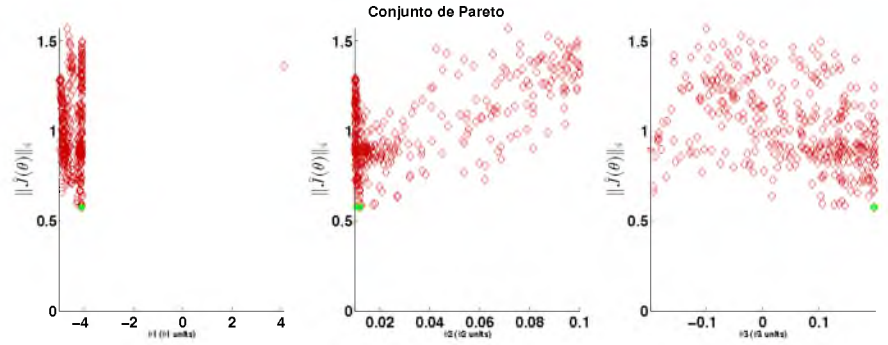


Figura 2.12: Conjunto de Pareto en Diagramas de Nivel.

En la siguiente sección se proporciona un ejemplo sintonización de controladores lineales a través de un algoritmo evolutivo multiobjetivo, en el cual se aplica la metodología que se ha explicado en el presente capítulo.

2.5. Ejemplo de Optimización Multiobjetivo

El ejemplo es un trabajo presentado en el evento denominado *IV Jornada de Ingeniería en alimentos*, llevado a cabo en la Universidad del

Papaloapan, Campus Tuxtepec del 30 al 31 de octubre de 2017.

La metodología se divide en partes principales:

2.5.1. Primera etapa - Análisis y planteamiento del problema

1. Es usual plantear un problema de diseño como un problema de optimización.
2. Es común considerar diversos objetivos, requerimientos y restricciones en el anterior problema de optimización.

$$\min_{\boldsymbol{\theta} \in \mathfrak{R}^n} \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = [J_1(\boldsymbol{\theta}), J_2(\boldsymbol{\theta}), \dots, J_m(\boldsymbol{\theta})] \in \mathfrak{R}^m$$

sujeito a:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\theta}) \leq 0$$

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}) = 0$$

$$\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \overline{\theta}_i,$$

$$i = [1, \dots, n]$$

3. Un esquema generalizado es proponer índices que reflejen el rendimiento deseado de los requisitos anteriores.

- Para el escenario regulatorio:

$$J(\theta_1, \theta_2) = ITSE_{regulatorio} = \int_0^N te^2(t)dt$$

$$J(\theta_1, \theta_2) = TVU_{regulatorio} = \sum_{k=1}^N |u(k) - u_{(k-1)}|$$

- Para el escenario servo:

$$J(\theta_1, \theta_2) = ITSE_{servo} = \int_0^N te^2(t)dt$$

$$J(\theta_1, \theta_2) = TVU_{servo} = \sum_{k=1}^N |u(k) - u_{(k-1)}|$$

$$\theta_1 = k_p, \theta_2 = k_i$$

- Parámetro de estabilidad del sistema de control:

$$Abscisa = \text{Min}\{abs[Re(\lambda_i)]\}$$

donde: λ_i de la matriz característica del sistema de control.

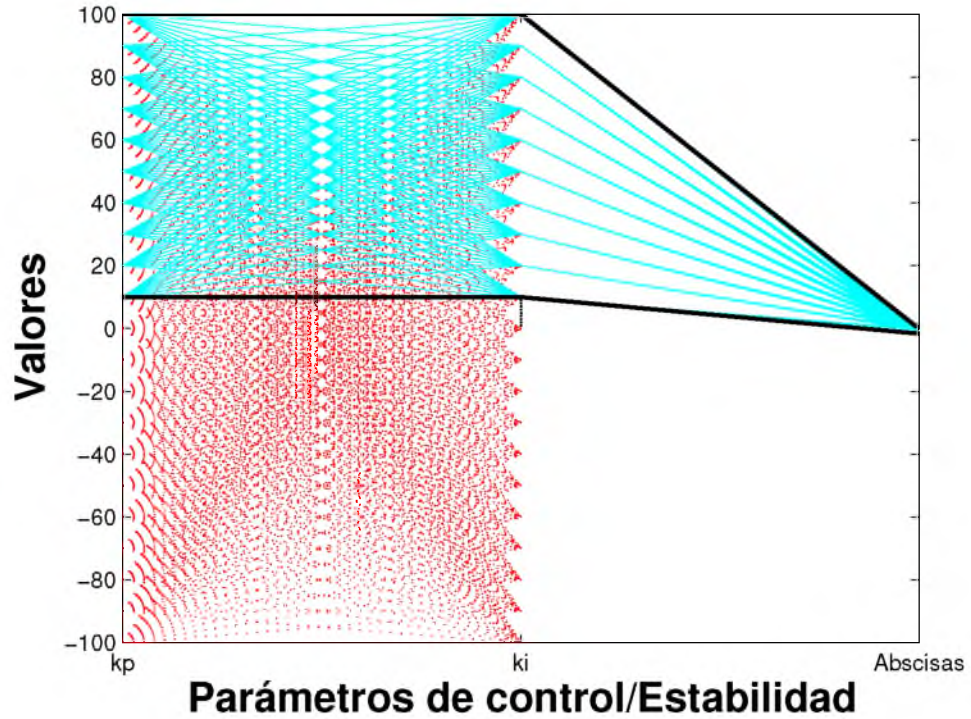


Figura 2.13: Región de búsqueda estable (color azul).

4. Delimitar una región de búsqueda para k_p y k_i por medio del parámetro de estabilidad para una posterior optimización (Fig. 2.13) .
5. La optimización multiobjetivo plantea el problema anterior al optimizar simultáneamente todos los índices (Fig. 2.2).

2.5.2. Segunda Etapa - Metodología de diseño mediante optimización multi-objetivo aplicada al ajuste de controladores PI

1. Diseño de optimización Multi-objetivo (Metodología, Generar primero, Elegir Después), (Fig. 2.5).
2. Proceso de diseño:
 - Se define un problema multiobjetivo con índices de desempeño y un parámetro de estabilidad.
 - Índices a optimizar: $ITSE_{regulatorio, servo}$, $TVU_{regulatorio, servo}$, Abscisa espectral.

- Se utiliza el algoritmo **sp-MODE**, el cual es un algoritmo evolutivo multiobjetivo.
- Se analiza el intercambio de prestaciones en el frente de Pareto con Coordenadas paralelas.
- El rendimiento de los controladores, es calculado en un punto de operación inestable del bioreactor de Cholette (Fig. 1.3).

$$\begin{aligned} \text{Punto de operación: } c_{fs} &= 3.288 \text{ kg mol m}^{-3}, c_s = 1.303 \text{ kg mol m}^{-3} \\ c_{es} &= 1.8 \text{ kg mol m}^{-3} \end{aligned}$$

2.5.3. Tercer etapa- Resultados del análisis del frente de Pareto y de la implementación de los controladores seleccionados

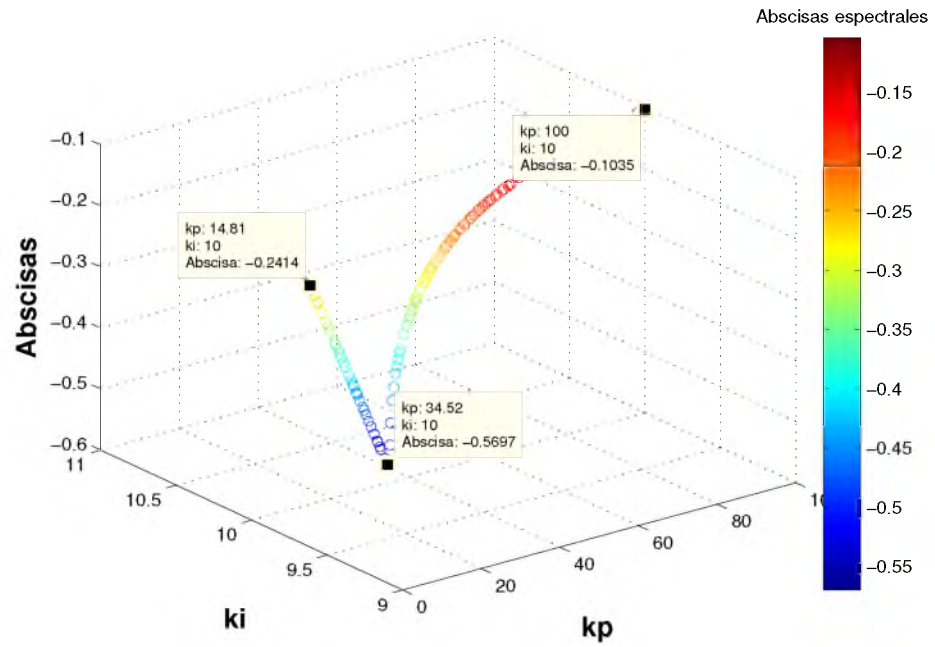
1. Análisis del conjunto de Pareto (Figs. 2.14 y 2.15).
2. Análisis del frente de Pareto en coordenadas paralelas (Fig. 2.16).

De los resultados que se presentan, es importante comentar que para el control tomado como referencia, tanto el diseño del sistema como y el proceso de optimización se llevó a cabo con el sistema lineal. En cambio, para el desarrollo de esta tesis, el diseño del sistema se llevó a cabo con el modelo lineal con el propósito de buscar una región estabilidad y con ello establecer los límites (espacio de búsqueda) para el proceso de optimización. Posteriormente, la optimización y evaluación se llevó a cabo con el modelo no lineal con el objetivo de tener una aproximación más real del sistema.

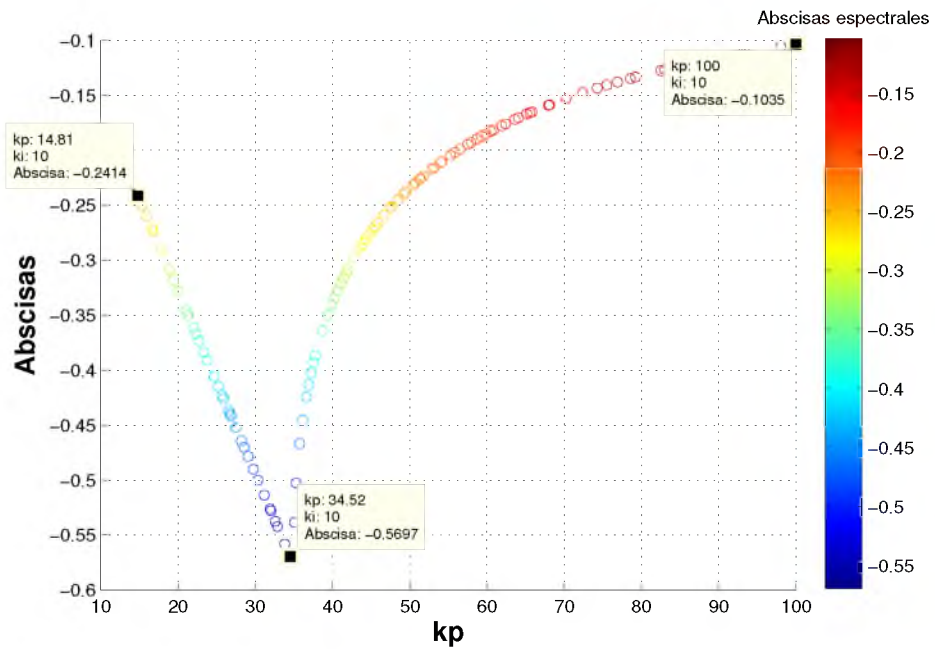
En el misma Figura 2.16, se puede observar que se tiene ventaja con las soluciones obtenidas por optimización con respecto al control tomado de referencia, ya que por ejemplo, para el $ITSE_{regulatorio}$ este índice es menor para todas las soluciones obtenidas por optimización. Para el índice $ITSE_{servo}$ se tienen soluciones que superan al control tomado de referencia, aunque también existen soluciones que son superadas por éste. Un comportamiento similar se tiene con el índice $TVU_{regulatorio}$. Para el índice TVU_{servo} se observa que el control tomado de referencia supera a las soluciones obtenidas por optimización.

En general se puede decir que los controladores PI obtenidos por optimización muestran un mejor desempeño que el controlador que sirvió como comparativo en diferentes regiones del frente de Pareto y por simulación numérica como se muestra en la figura 2.17.

3. Simulación de los controladores obtenidos y el propuesto por (Shariati y cols., 2014).



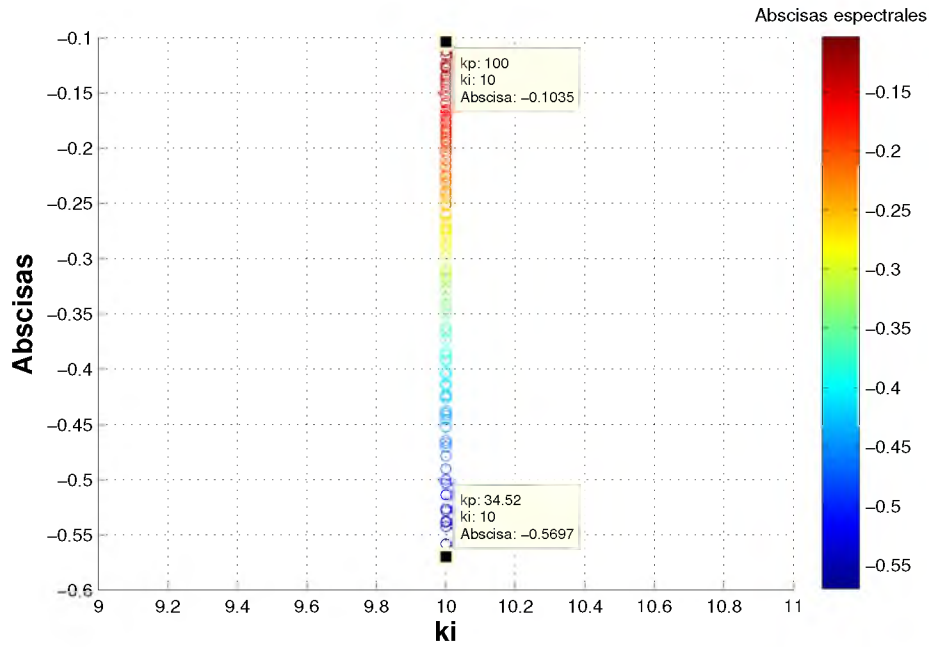
(a) Relación entre Abscisas, k_p y k_i .



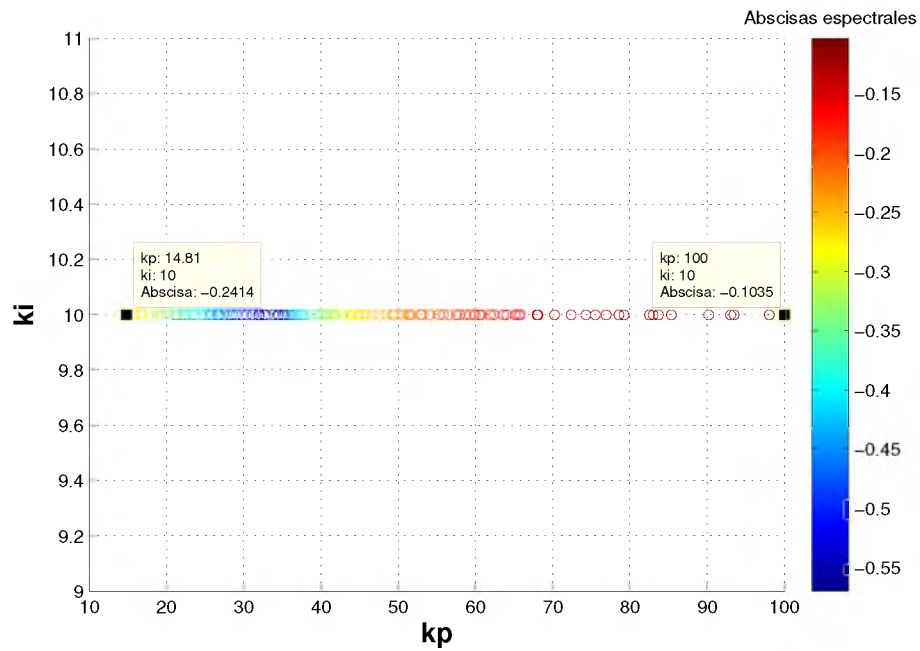
(b) Relación entre Abscisas y k_p .

Figura 2.14: Conjunto de Pareto.

2.5. Ejemplo de Optimización Multiobjetivo



(a) Relación entre Abscisas y k_i .



(b) Relación entre k_p y k_i .

Figura 2.15: Conjunto de Pareto.

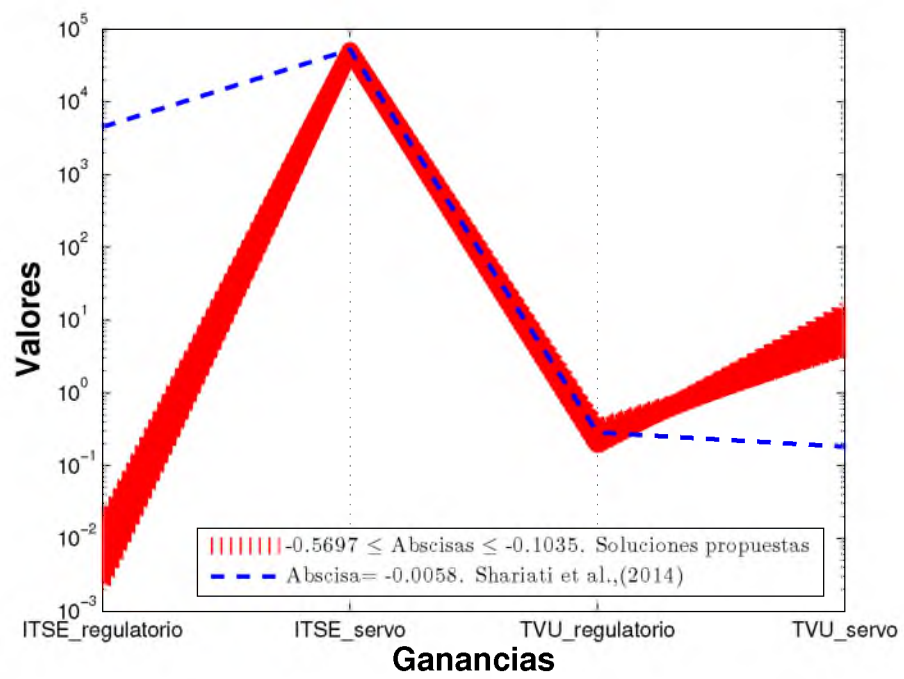
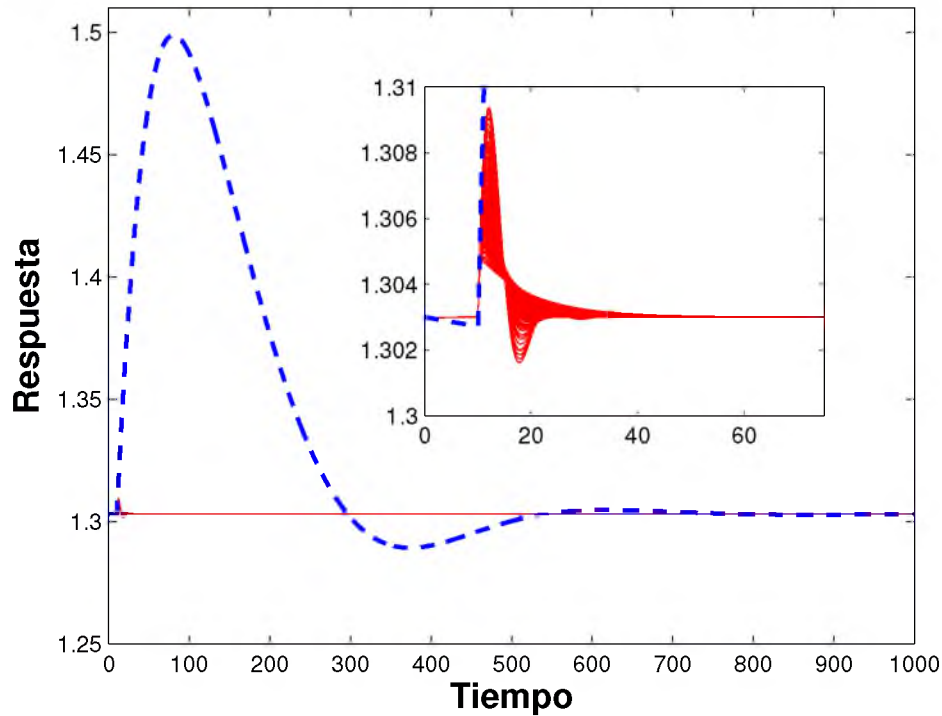
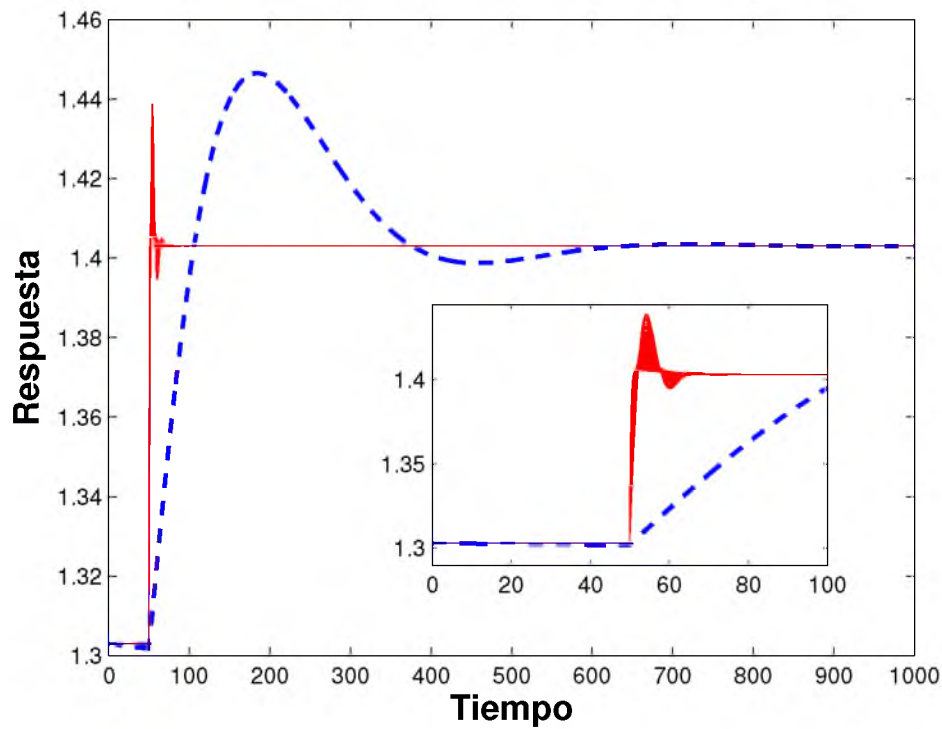


Figura 2.16: Concepto de diseño PI, escala logarítmica.

2.5. Ejemplo de Optimización Multiobjetivo



(a) Salidas del sistema PI, regulatorio.



(b) Salidas del sistema PI, servo.

Figura 2.17: Resultados de la simulación

Capítulo 3

Metodología

3.1. Planteamiento de la metodología para establecer una región de estabilidad

Se dice que un sistema es estable, si y solo sí, su respuesta en el tiempo permanece limitada o controlada, para una entrada limitada (Smith, Corripio, y Basurto, 1991). Dos condiciones son necesarias para mantener la estabilidad del sistema. La primera condición, es que la parte real de los eigenvalores siempre debe ser menor que cero ya sea que éstos sean reales ($\lambda = \sigma$) o complejos ($\lambda = \sigma + wi$) (Ecs. 3.1 y 3.2). La segunda consiste en maximizar la parte real mínima de dichos valores propios (Ecs. 3.3 y 3.4) y de esta manera minimizar el tiempo de estabilización. Por lo anterior, es pertinente suponer que un criterio de sintonización factible puede ser la maximización de la parte mínima de los eigenvalores de acuerdo con (García-Alvarado y cols., 2005).

$$Re(\lambda_i) < 0, \quad \forall_i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

$$\lambda_i = \sigma + wi, \quad \text{donde,} \quad \sigma < 0 \quad (3.2)$$

$$r_{min} \rightarrow Max \quad (3.3)$$

$$r_{min} = Min\{abs[Re(\lambda_i)]\} \quad (3.4)$$

Con las condiciones y restricciones expresadas anteriormente (Ecs. 3.1 - 3.4) se asegura que el sistema controlado será estable y el comportamiento más aproximado al esperado por el Ing. de control o diseñador.

El procedimiento que se describe a continuación corresponde a la metodología de búsqueda de una región de estabilidad y que puede ser aplicado a cualquier sistema (o problema) de estudio como también puede ser aplicado

```

1 Se establece espacio inicial de búsqueda para los parámetros de
  control  $\theta_1, \theta_2, \theta_3 [\beta_{inferior}, \beta_{superior}]$ ;
2 Se inicia el mapeo con las condiciones iniciales;
3 while (  $p_1 \leq \beta_{superior}$  ) do
4   while (  $p_2 \leq \beta_{superior}$  ) do
5     while (  $p_3 \leq \beta_{superior}$  ) do
6        $MatrizA = \{soluciones\ estables + soluciones\ inestables\}$ 
7        $p_3 = p_3 + 1$ ;
8     end
9      $p_2 = p_2 + 1$ ;
10     $lhead$ 
11  end
12   $p_1 = p_1 + 1$ ;
13 end
14 Se discriminan soluciones estables e inestables;
15    $MatrizE = MatrizA \{soluciones\ estables\}$  ;
16 Se obtiene intervalo de soluciones estables;
17    $[\delta_{inferior}, \delta_{superior}]$  ;
18 Se obtiene abscisa mínima y máxima del intervalo de soluciones
  estables;
19    $[Abs_{min}, Abs_{max}]$  ;

```

Algoritmo 1: Algoritmo que obtiene una región de estabilidad de un sistema en lazo cerrado.

a cualquier estructura de control (concepto de diseño), que puede ser por ejemplo, un PI, PwI, PID, PIDn, entre otros. Dicha metodología se detalla en el siguiente algoritmo (Alg. 1). En principio, se debe tener como punto de partida alguna referencia bibliográfica de control aplicado al sistema que se requiere estudiar o controlar.

Para emprender el proceso de búsqueda de la región de estabilidad, se comienza con un intervalo inicial de búsqueda muy amplio para cada uno de los parámetros de control ($\beta_{inferior} \leq \theta_1 \leq \beta_{superior}$, $\beta_{inferior} \leq \theta_2 \leq \beta_{superior}$, $\beta_{inferior} \leq \theta_n \leq \beta_{superior}$) del concepto de diseño en cuestión. Estos intervalos iniciales de búsqueda, son los datos de entrada para el algoritmo (Alg. 1) que se encarga de buscar la región (zona) de estabilidad para el problema de estudio, de acuerdo al concepto de diseño que se desea aplicar. Al finalizar la ejecución del algoritmo, éste proporciona un conjunto de soluciones estables (Fig. 3.1), pero además también proporciona el intervalo de estabilidad de cada parámetro de control así como también el valor mínimo y máximo de las abscisas espectrales del conjunto de soluciones estables (zona estable).

3.1. Planteamiento de la metodología para establecer una región de estabilidad

Los resultados que se obtienen del proceso anterior, al determinar la estabilidad del sistema, de forma general se muestra un ejemplo (Tabla. 3.1) para un concepto de diseño PI. Pero como se mencionó anteriormente, se puede aplicar para otro concepto de diseño de estructura lineal (PI, PwI, PID, etc), adaptando solamente el número de parámetros de control de cada estructura.

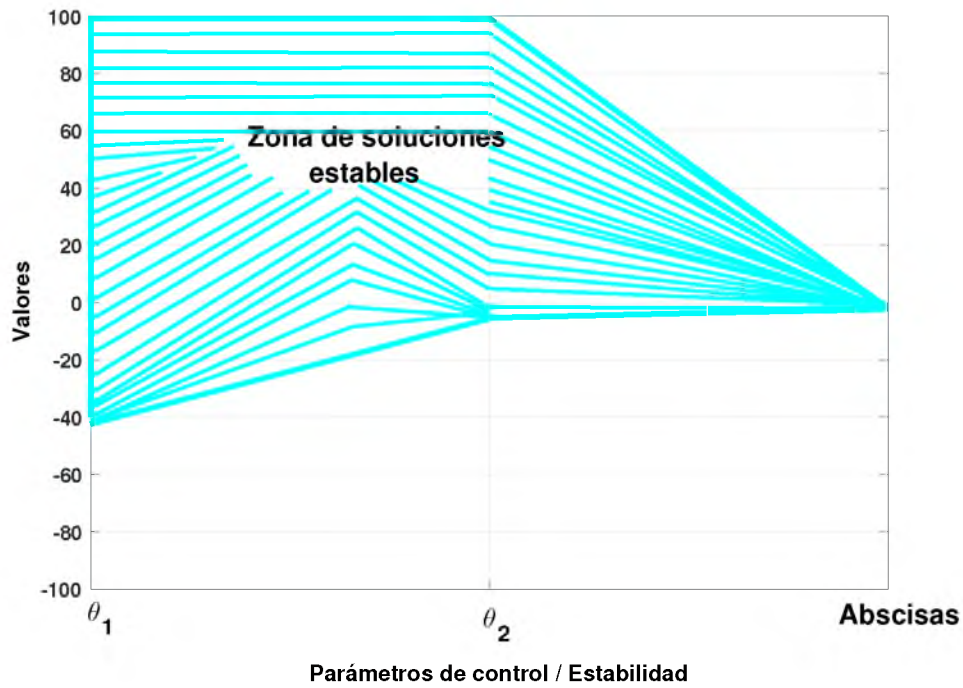


Figura 3.1: Representación de la zona de estabilidad del sistema.

Algoritmo de estabilidad					
Concepto de diseño	Espacio inicial de búsqueda		Zona de estabilidad		Zona de Abscisas estables
	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	min max
PI	$(\underline{\beta}_1, \overline{\beta}_1)$	$(\underline{\beta}_2, \overline{\beta}_2)$	$(\underline{\delta}_1, \overline{\delta}_1)$	$(\underline{\delta}_2, \overline{\delta}_2)$	Abs_{min} Abs_{max}

Tabla 3.1: Intervalos de espacio inicial de búsqueda, región de estabilidad, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el algoritmo 1 para el concepto de diseño PI.

Después de establecer los parámetros y encontrar la región de soluciones

estables se procede a la siguiente etapa de la metodología, que consiste en el proceso de optimización para cada concepto de diseño.

3.2. Metodología de optimización

El proceso de optimización, consiste en la búsqueda de soluciones óptimas entre los diferentes los objetivos involucrados (Ec. 3.5). Para ello, la zona de estabilidad obtenida en el proceso anterior (Tabla 3.1 tercer columna), serán los datos de entrada (población inicial) para el algoritmo de optimización multiobjetivo.

3.2.1. Planteamiento del problema y del proceso de optimización

El planteamiento del problema de optimización (Ec. 3.5) es el mismo para cualquier concepto de diseño, variando solamente en los respectivos parámetros de cada estructura.

$$\min \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = [ITSE_{regulatorio}(\theta), ITSE_{servo}(\theta), TVU_{regulatorio}(\theta), TVU_{servo}(\theta)] \quad (3.5)$$

También es importante definir un espacio de búsqueda (el cual estará definido por la región de estabilidad) para cada parámetro de control y para cada concepto de diseño. De forma general, el espacio de objetivos para el proceso de optimización puede definirse de la siguiente forma:

$$-\infty \leq ITSE_{regulatorio}, ITSE_{servo}, TVU_{regulatorio}, TVU_{servo} \leq \infty \quad (3.6)$$

y de manera particular, el espacio de búsqueda para cada concepto de diseño en particular, puede describirse como sigue:

1. El espacio de búsqueda para un concepto de diseño PI, se define como $\theta_{PI} = [k_p, k_i]$ donde:

$$\begin{aligned} \underline{k_p} &\leq k_p \leq \overline{k_p} \\ \underline{k_i} &\leq k_i \leq \overline{k_i} \end{aligned} \quad (3.7)$$

2. El espacio de búsqueda para un concepto de diseño PwI, se define como $\theta_{PwI} = [k_p, k_i, w_p]$ donde:

$$\begin{aligned} \underline{k_p} &\leq k_p \leq \overline{k_p} \\ \underline{k_i} &\leq k_i \leq \overline{k_i} \\ \underline{w_p} &\leq w_p \leq \overline{w_p} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3. El espacio de búsqueda para un concepto de diseño PID, se define como $\theta_{PID} = [k_p, k_i, k_d]$ donde:

$$\begin{aligned} \underline{k_p} &\leq k_p \leq \overline{k_p} \\ \underline{k_i} &\leq k_i \leq \overline{k_i} \\ \underline{k_d} &\leq k_d \leq \overline{k_d} \end{aligned} \quad (3.9)$$

4. El espacio de búsqueda para un concepto de diseño PIDn, se define como $\theta_{PIDn} = [k_p, k_i, k_d, n]$ donde:

$$\begin{aligned} \underline{k_p} &\leq k_p \leq \overline{k_p} \\ \underline{k_i} &\leq k_i \leq \overline{k_i} \\ \underline{k_d} &\leq k_d \leq \overline{k_d} \\ \underline{n} &\leq n \leq \overline{n} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Al final del proceso de optimización se obtiene un conjunto de soluciones óptimas que se le conoce como conjunto de Pareto (P_s) y su equivalente en el espacio de objetivos que se le conoce como frente de Pareto (P_f) como se muestra la figura 2.4.

A partir del P_s se obtiene su correspondiente abscisa espectral de cada solución que va a permitir controlar en mayor o menor grado el sistema en cuestión y como ejemplo se muestran los resultados para un concepto diseño PI (Tabla. 3.2).

Algoritmo de optimización multiobjetivo						
	Zona de estabilidad		Conjunto de Pareto		Intervalo de Abscisas estables	
Concepto de diseño	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	min	max
PI	$(\underline{\delta_1}, \overline{\delta_1})$	$(\underline{\delta_2}, \overline{\delta_2})$	$(\underline{\sigma_1}, \overline{\sigma_1})$	$(\underline{\sigma_2}, \overline{\sigma_2})$	Abs_{min}	Abs_{max}

Tabla 3.2: Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valor mínimo y máximo de abscisas espectrales obtenidas mediante el algoritmo de optimización multiobjetivo para el concepto de diseño PI.

3.2.2. Análisis del conjunto de Pareto en diagramas de dispersión

Al terminar el proceso de optimización se obtiene el conjunto de Pareto que está formado por parámetros de control (θ_1 , θ_2 , θ_3 o θ_4) dependiendo

de la estructura de control que se este empleando.

A partir de dicho conjunto de Pareto se calcula la abscisa espectral para cada solución que forma parte de éste. El valor de la abscisa, indicará el grado de estabilidad de cada solución, es decir, entre más negativo sea su valor mayor será su grado de estabilidad, por el contrario, el grado de estabilidad será menor conforme el valor de la abscisa sea más cercano a cero. De los resultados anteriores se crean tres principales zonas: zona estable, zona con estabilidad intermedia y zona poco estable con la finalidad de establecer mayor claridad para su análisis. En la figura 3.2 se muestra un ejemplo para un concepto de diseño PI, que sólo tiene dos parámetros de control (θ_1 y θ_2) pero este mismo procedimiento puede ser aplicado para un PID (θ_1 , θ_2 y θ_3) o para un PwI (θ_1 , θ_2 y θ_3).

De igual manera, en el mismo proceso también se determina el intervalo estable de cada parámetro de control obteniendo su valor máximo y mínimo, como se muestra en la Tabla 3.2, en la cual se pone un ejemplo para un concepto de diseño PI, pero como se dijo en párrafo anterior, puede ser aplicado para otra estructura de control.

Después de analizar el comportamiento de los parámetros de control (θ_1 , θ_2) y establecer regiones de estabilidad, se procede a realizar una análisis más detallado mediante el uso de coordenadas paralelas que es una herramienta de visualización.

3.2.3. Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas

De igual manera, utilizando coordenadas paralelas se lleva a cabo un análisis más exhaustivo del conjunto de Pareto. Para ello, también se establecen tres zonas o regiones principales (Fig. 3.3) como se establecieron en la sección anterior (3.2.2) tomando la abscisa espectral como parámetro principal para establecer dichas regiones. El color azul representa a la zona con abscisas espectrales más negativas y por ende representa las soluciones con mayor estabilidad. El color verde representa a la región con estabilidad intermedia y corresponde a las abscisas espectrales más positivas que la zona estable, pero menos negativas que las abscisas con poca estabilidad. En tanto que la zona de color rojo etiquetada como zona poco estable está formada por las abscisas más positivas, algunas de ellas tal vez cercanas a cero, lo que representa a las soluciones menor estabilidad.

En la Figura 3.3 es importante aclarar que aunque se está utilizando como ejemplo un concepto de diseño PI (θ_1 y θ_2), esta figura representa o ejemplifica el mismo procedimiento para cualquier otro concepto de diseño

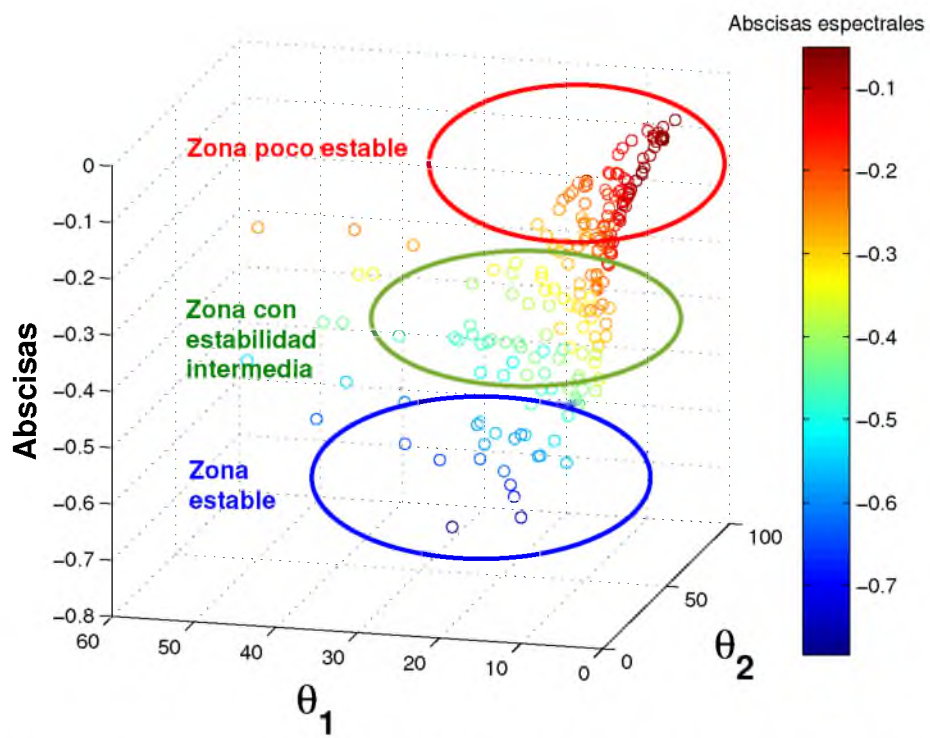


Figura 3.2: Representación de la estabilidad del sistema para un concepto de diseño PI.

que tenga más de dos parámetros, es por ello que la notación es de $(\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n)$.

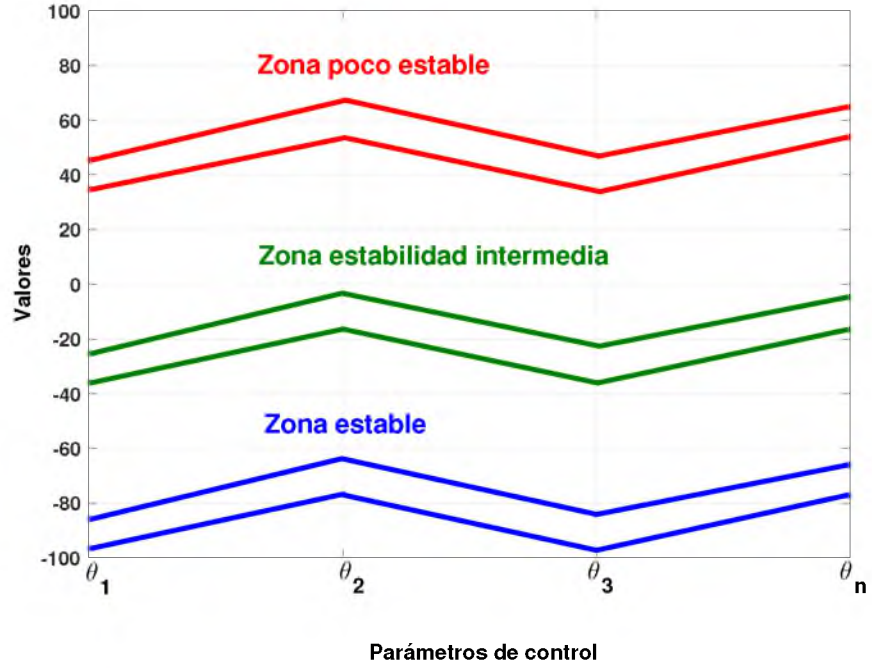


Figura 3.3: Representación de regiones de estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Enfatizando un poco más en las regiones y dado que la clasificación se basa en la abscisa espectral de cada una de las soluciones que forman el P_s , se puede remarcar lo siguiente:

$$Abscisas(zona\ estable) \leq Abscisas(zona\ estabilidad\ intermedia) \leq Abscisas(zona\ poco\ estable).$$

Lo anterior indica, que en el momento de implementar alguna solución, sería pertinente elegir alguna del conjunto con mayor grado de estabilidad, ello podría garantizar mayor posibilidad de controlar o estabilizar el sistema en comparación con alguna solución que tenga poca estabilidad.

3.3. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas

Las coordenadas paralelas adoptan un enfoque diferente para la visualización de datos multidimensionales. La posición en paralelo de cada uno de los ejes, permite que se visualicen 1, 2, 3 o más dimensiones en la pantalla, permitiendo así observar la interrelación de los datos.

Por lo tanto, un análisis en coordenadas paralelas (Fig. 3.4) le permite al **DM** realizar un análisis visual más detallado del comportamiento de los diferentes objetivos ($J(\theta_1), J(\theta_2), J(\theta_3), \dots, J(\theta_n)$) planteados en cada uno de los conceptos de diseño.

Para un análisis más profundo, el frente de Pareto se divide en tres intervalos que se definen a partir de la abscisa espectral del conjunto de soluciones que se obtuvo en el proceso de la optimización. Estos tres intervalos definirán tres zonas (de estabilidad) principales denominadas: zona estable, zona con estabilidad intermedia y zona poco estable.

Es importante enfatizar, que la separación en zonas de estabilidad del frente de Pareto, es el mismo proceso que se realizó para el conjunto de Pareto, por lo tanto, en base al valor de la abscisa espectral se asigna a una u otra zona, como se describe a continuación (Tabla. 3.3):

Zonas de estabilidad				
Límite inferior		Zona		Límite superior
$\text{Abscisa}_{\text{mínima}}$	$\leq$	Zona estable	$\leq$	$\lim_{(ze)}$
$\lim_{(ze+\Delta ze)}$	$\leq$	Zona estabilidad intermedia	$\leq$	$\lim_{(zei+\Delta ze i)}$
$\lim_{(zei+\Delta ze i)}$	$\leq$	Zona poco estable	$\leq$	$\text{Abscisa}_{\text{máxima}}$

ze: Zona estable. Δze : Incremento de zona estable.
zei: Zona de estabilidad intermedia. $\Delta ze i$: Incremento de zona de estabilidad intermedia.

Tabla 3.3: Definición de las tres zonas de estabilidad.

Por lo tanto siempre se cumplirá la condición de que:

$$(\text{Abscisa de zona estable}) \leq (\text{Abscisa de zona estabilidad intermedia}) \leq (\text{Abscisa de zona poco estable}).$$

El análisis en coordenadas paralelas es importante, debido a que se puede observar y comparar entre la solución del control que se toma de referencia y las soluciones (obtenidas mediante el proceso de optimización) que se proponen, como se puede observar en la Figura 3.4, que muestra un ejemplo de un frente de Pareto para un PI, con cuatro índices (objetivos).

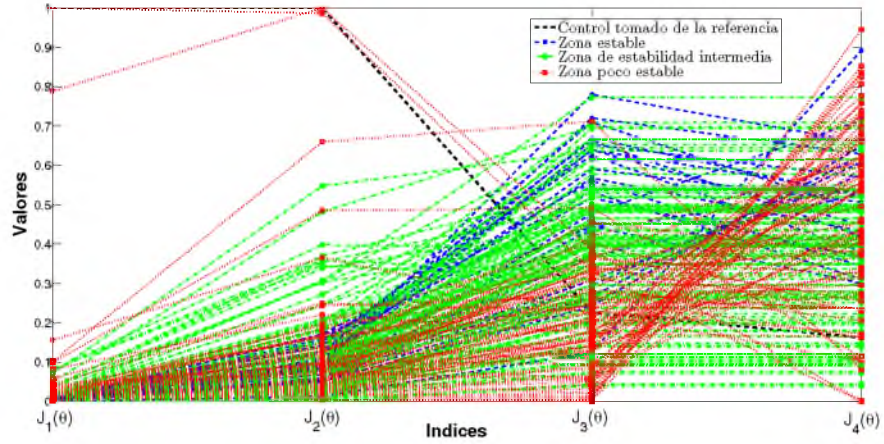


Figura 3.4: Representación del frente de Pareto de un concepto de diseño PI.

Por consiguiente, después de que el DM haya examinado con detalle la relación, ventajas y desventajas (posiblemente) de la interrelación entre los diferentes objetivos a partir de la estabilidad de las soluciones, es conveniente o necesario observar ahora como es el comportamiento de las soluciones en el dominio del tiempo.

3.4. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo

Después de analizar y comparar visualmente el conjunto y frente de Pareto. Ahora es necesario llevar a cabo una evaluación (análisis cuantitativo) mediante la simulación en el dominio del tiempo de cada una de las soluciones.

La evaluación numérica se lleva a cabo para la salida del sistema y para la señal de control. Además se aplica tanto para el escenario regulatorio (Fig. 3.5 y 3.6) como para el escenario servo (Fig. 3.7 y 3.8).

Para la señal de salida, ya sea en escenario regulatorio o en escenario servo se evalúa el conjunto de Pareto en el dominio del tiempo. De igual manera, como se explicó en la sección 3.3, se divide entre tres principales zonas de estabilidad: zona estable (se identifica con el color azul), zona con estabilidad intermedia (se identifica con el color verde) y zona poco estable (se identifica con el color rojo). Como se puede observar en las figuras de ejemplo (Figs. 3.5 y 3.7) cada región de estabilidad muestra cierto patrón, por ejemplo, mayor o menor sobresalto, mayor o menor bajosalto, un tiem-

3.4. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo

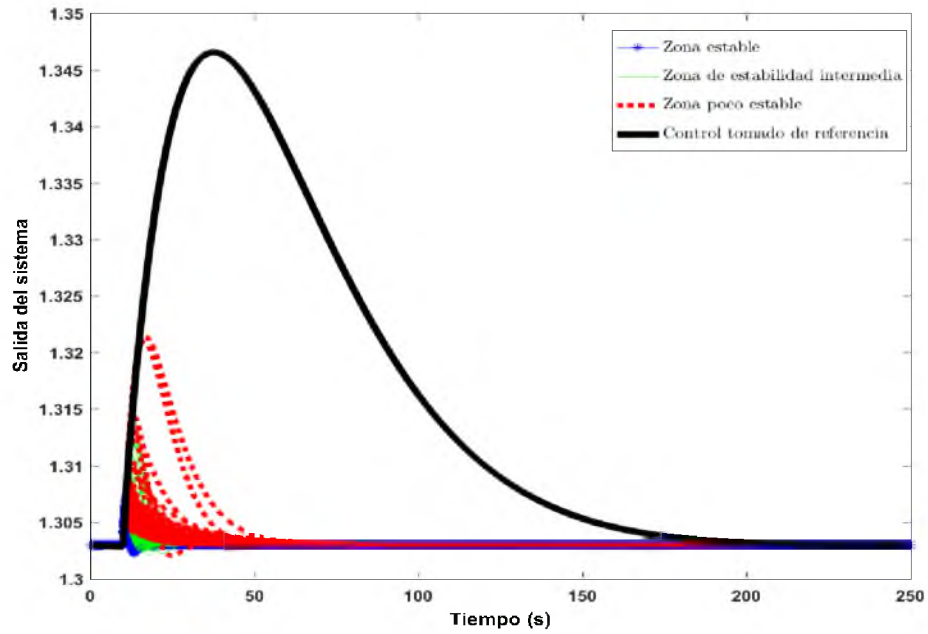


Figura 3.5: Salida del sistema, escenario regulatorio.

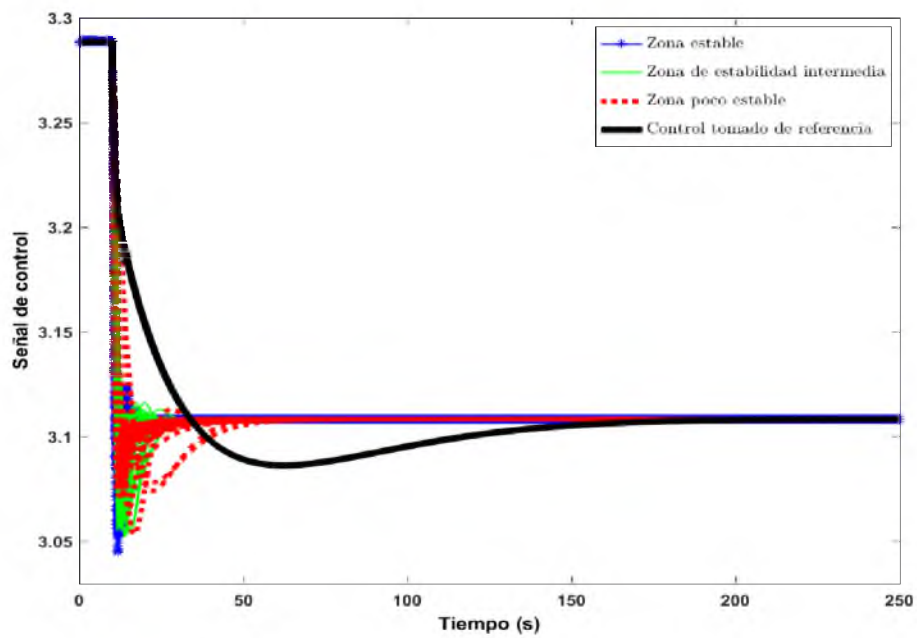


Figura 3.6: Señal de control, escenario regulatorio.

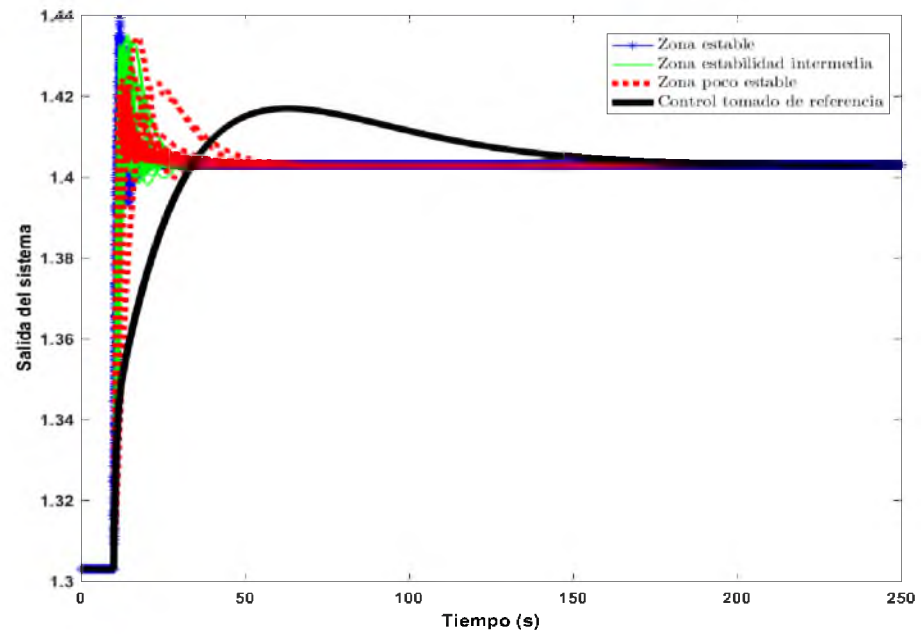


Figura 3.7: Salida del sistema, escenario servo.

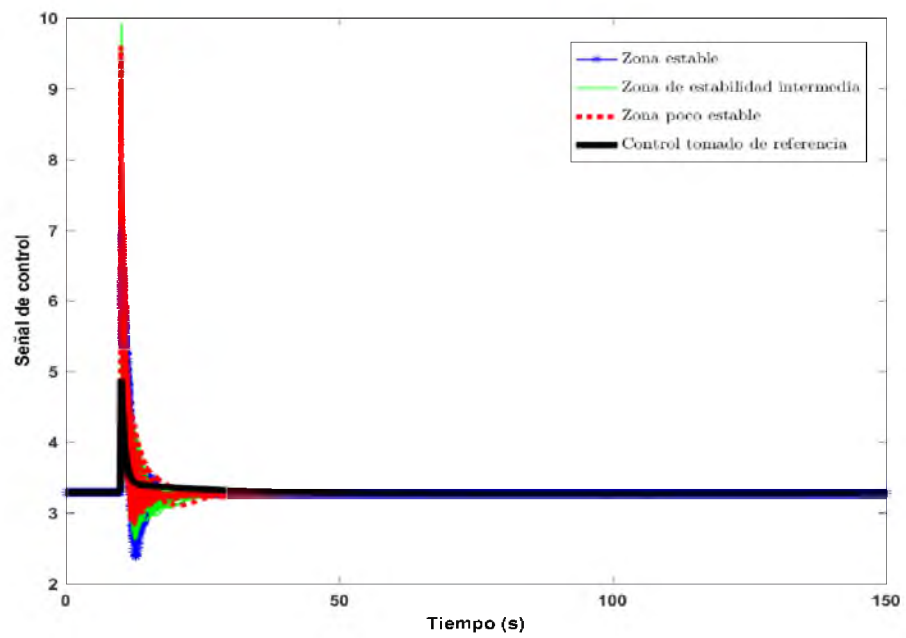


Figura 3.8: Señal de control, escenario servo.

po de asentamiento más pequeño o prolongado que otras soluciones de otra región o en ocasiones también podrían presentarse cierta similitud, todo dependerá de la magnitud de su abscisa espectral.

También para la señal de control en ambos escenarios regulatorio y servo, de igual manera el conjunto de Pareto se divide en las tres principales zonas de estabilidad mencionadas anteriormente (Figs. 3.6 y 3.8), esta operación le dará un indicio al DM del comportamiento del sistema en el momento de tomar una decisión a cerca de como varía el control de cada una de las soluciones.

Después de llevar a cabo un proceso de búsqueda de una zona o región de estabilidad, un proceso de optimización, un análisis en coordenadas paralelas del conjunto y frente de Pareto, así como análisis en el dominio del tiempo para cada concepto de diseño. Ahora se realiza una comparación (evaluación) entre los diferentes concepto de diseño aplicados al problema con la finalidad de elegir alguno en particular.

3.5. Comparación y elección de conceptos de diseño

Al llegar a esta etapa, significa que varios conceptos de diseño ya han sido aplicados a un mismo estado estacionario. Por ejemplo, en la Figura (3.9), se muestran los frentes de Pareto de cuatro diferentes conceptos de diseño. Por ejemplo, la Figura 3.9a representa el conjunto de soluciones de un concepto de diseño PI, la Figura 3.9b representa el conjunto de soluciones de un concepto de diseño PwI y las Figuras 3.9c,d representan el frente de Pareto de un concepto de diseño PID y PIDn respectivamente. Pero ahora surge la pregunta. ¿Cuál de ellos sería el más adecuado?, pues bien, para tomar una decisión es necesario realizar un análisis entre ellos. En primer lugar, se compara de manera detallada el balance de cada función objetivo (Fig. 3.10). En segundo lugar, se realiza una comparación por medio la magnitud de su media aritmética de cada uno de los índices ($J_1(\theta)$, $J_2(\theta)$, $J_3(\theta)$, $J_4(\theta)$) para cuatro diferentes conceptos de diseño (PI, PwI, PID y PIDn) como se muestra en la Figura 3.11, por ejemplo, se observa que para $J_1(\theta)$ es mejor el PwI, seguido por el PI, después el PID y por último el PIDn. Para el $J_2(\theta)$ es mejor el PIDn, seguido por el PwI, posteriormente el PID y por último el PI. Para el $J_3(\theta)$ nuevamente el PwI es mejor, seguido por el PI y PID que son muy semejantes y posteriormente el PIDn y por último para $J_4(\theta)$ se observa que el PIDn es mejor seguido por el PI y por último el PwI. De esta manera se puede observar la tendencia de cada concepto de diseño, permitiendo así DM o ingeniero de control una apreciación global al tomador de decisiones.

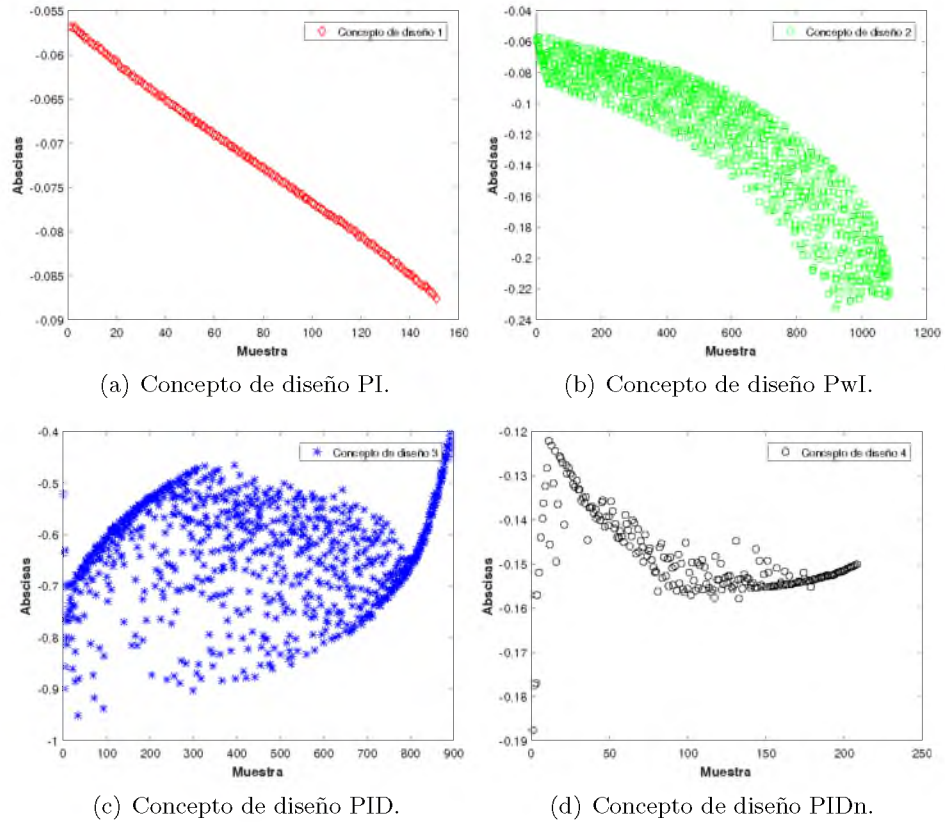


Figura 3.9: Cuatro conceptos de diseño diferentes.

A partir de las Figuras (3.9 - 3.11) se considera que el DM tiene una visión más clara de las ventajas y desventajas de cada concepto de diseño.

3.5.1. Resumen de la metodologías por medio de un diagrama de flujo

De manera general la metodología expuesta se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo, ver Figura (Fig. 3.12).

3.5. Comparación y elección de conceptos de diseño

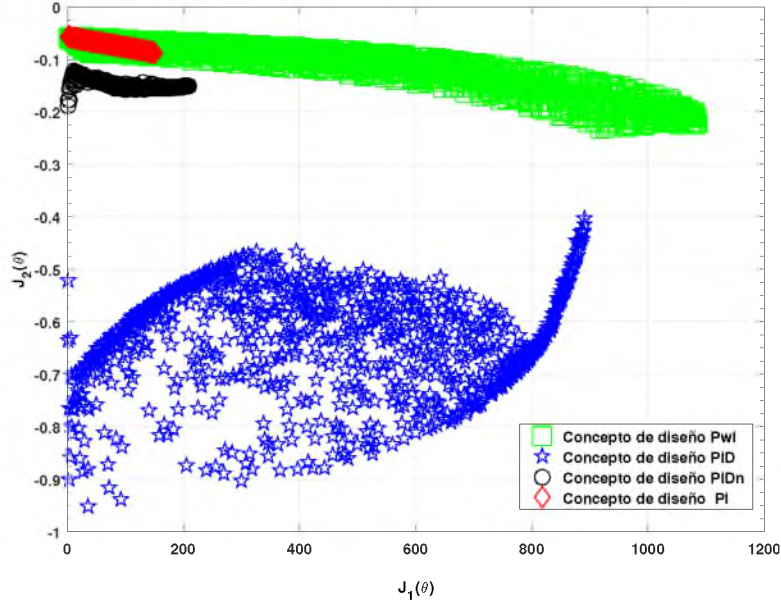


Figura 3.10: Comparación general de frentes de Pareto para cuatro conceptos de diseño.

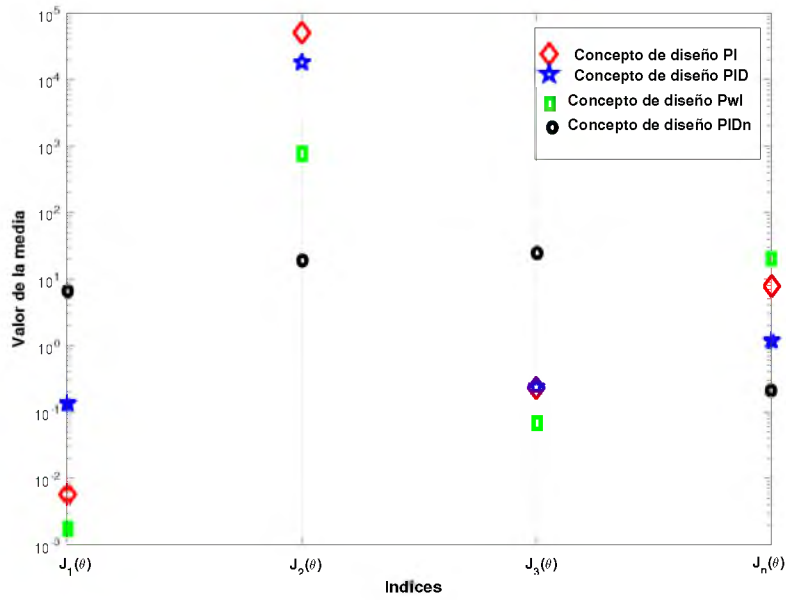


Figura 3.11: Comparación cuantitativa de cuatro conceptos de diseño.

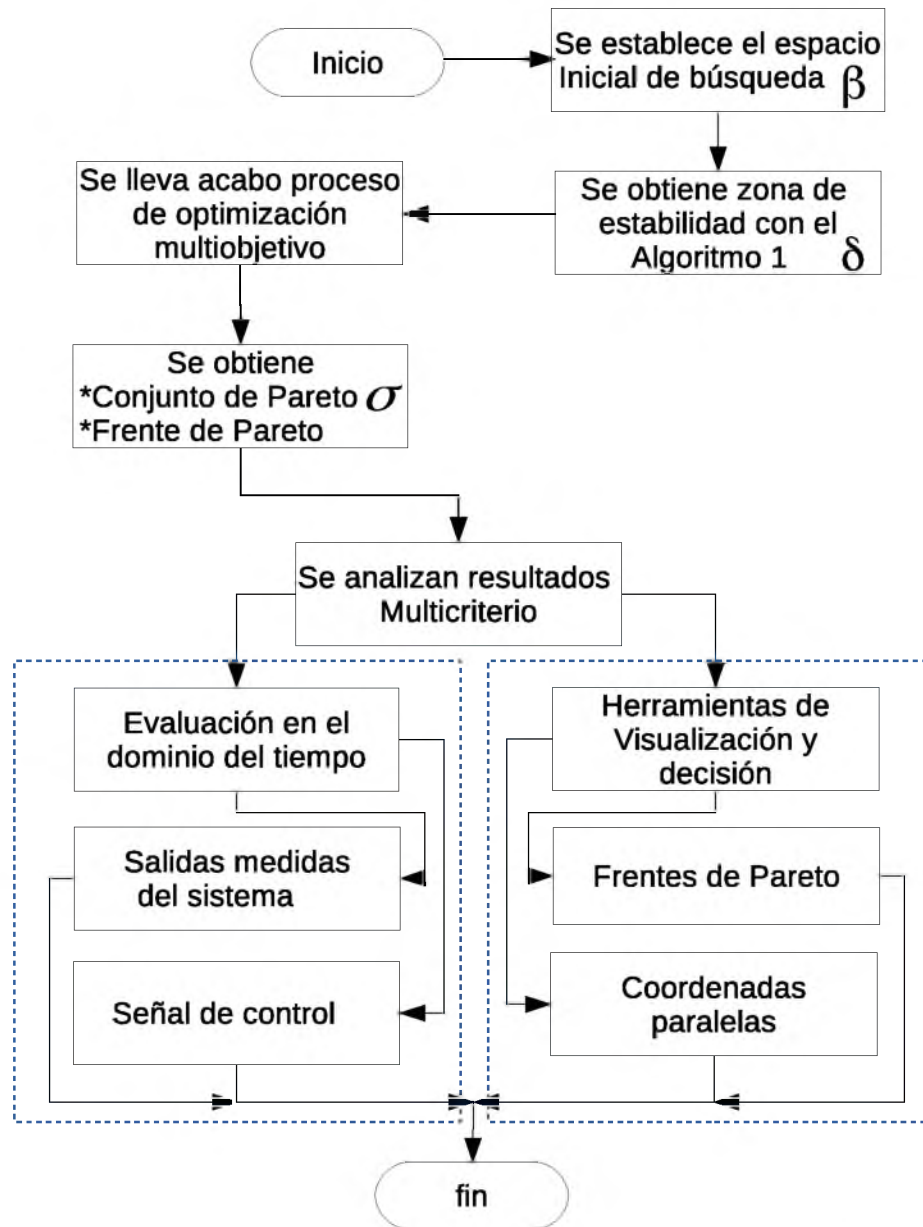


Figura 3.12: Diagrama de flujo para el proceso de optimización.

Capítulo 4

Caso de Estudio

4.1. Diferentes conceptos de diseño en un mismo estado estacionario

Después de haber establecido en el capítulo anterior una metodología para proceso de sintonización, optimización y evaluación. En este capítulo se aplicará dicha metodología al sistema de estudio (Bioreactor de Cholette) y se aplicará para para cuatro conceptos de diseño PI, PwI, PID y PID_n.

4.1.1. Planteamiento de la región de estabilidad

Se han empleado cuatro conceptos de diseño: PI, PwI, PID, PID_n descritos en las ecuaciones (1.9, 1.8, 1.7 y 1.10) respectivamente, con fin de evaluar de manera global las prestaciones de cada uno de estos. Los conceptos de diseño mencionados, se utilizarán para controlar el estado estacionario descrito en la Tabla 4.1, el cual es inestable y pertenece a un conjunto de puntos de operación con multiplicidad. Para ello, se ha evaluado el sistema en lazo cerrado en los escenarios regulatorio y servo mediante los índices ITSE y TVU en dominio del tiempo.

Estado estacionario	Concentración de alimentación(C_{fs}) kg mol m ⁻³	Concentración de sustrato(C_s) kg mol m ⁻³	Concentración de salida(C_{es}) kg mol m ⁻³	Indices (regulatorio, servo)	Conceptos de diseño
Estado2 (inestable) Abscisa=0.0102	3.288	1.303	1.8	ITSE TVU	PI PwI PID PID _n

Tabla 4.1: Cuatro conceptos de diseño aplicado a un punto de operación.

Para determinar la región de estabilidad de cada concepto de diseño se utiliza como punto de partida las siguientes propuestas obtenidas de bibliografía:

Capítulo 4. Caso de Estudio

1. Para PI, (Ec. 1.9): $k_p = 0.6554$, $k_i = 0.0064$, (Shariati y cols., 2014).
2. Para PwI, (Ec. 1.8): $k_p = 1.24$, $k_i = 0.0127$, $w = 0.1517$, (Sree y Chidambaram, 2003b).
3. Para PID, (Ec. 1.7): $k_p = 3.151$, $k_i = 0.0585$, $k_d = 18.4649$, (Jhunjunwala y Chidambaram, 2001).
4. Para PIDn, (Ec. 1.10): $k_p = 1.4715$, $k_i = 0.0147$, $k_d = 6.392$, $n=10$, (Rajinikanth y Latha, 2012b).

De las propuestas anteriores, se procede a ampliar el intervalo de cada parámetro de los conceptos de diseño (Tabla 4.2) para ejecutar el Algoritmo 1, con el fin de obtener soluciones potenciales que garanticen estabilidad.

De los resultados obtenidos de la estabilidad, se utilizan como puntos de partida para un posterior proceso de optimización, el cual tiene como entrada el intervalo de la zona de estabilidad (Tabla 3.2). Con estos datos se lleva a cabo un proceso de optimización multiobjetivo, obteniendo así un conjunto de soluciones óptimas que representan el conjunto y frente de Pareto respectivamente. Es importante señalar que de estas soluciones obtenidas en el proceso de optimización ninguna es mejor que otra, si no más bien cada una de ellas representa un grado de compromiso diferente entre los objetivos involucrados. Posteriormente, viene una etapa muy importante en la que se define un resultado, para ello es necesario tomar decisiones multicriterio, para lo cual se subdivide en dos tipos de análisis, por un lado, se analizan las salidas del sistema y señales de control en el dominio del tiempo y por otro lado se utilizan herramientas de visualización y de decisión para realizar un análisis mediante coordenadas paralelas con el fin de analizar los respectivos frentes de Pareto.

Concepto de diseño	k_p		k_i		k_d		w_p		n		Tamaño de paso
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
PI	-100	100	-100	100	-	-	-	-	-	-	10
PwI	-100	100	-100	100	-	-	-100	100	-	-	10
PID	-100	100	-100	100	-100	100	-	-	-	-	10
PIDn	-100	100	-100	100	-100	100	-	-	-100	100	10

Tabla 4.2: Espacio general de búsqueda de estabilidad para cada concepto de diseño.

De la Tabla 4.2 es importante mencionar que la la región de búsqueda de estabilidad se realizó con un tamaño de paso igual a 10, ya que al hacerlo con un tamaño de paso menor, el esfuerzo de cómputo se incrementaba de manera considerable el proceso búsqueda colapsaba. Entonces, si se desea hacer una exploración más fina (disminuir el tamaño) de la región de estabilidad será necesario incrementar el esfuerzo de cómputo.

4.1. Diferentes conceptos de diseño en un mismo estado estacionario

4.1.2. Planteamiento del problema de optimización

El planteamiento del problema de optimización (Ec. 4.1) es el mismo para los cuatro conceptos de diseño, variando solamente en los respectivos parámetros de cada estructura.

$$\min \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = [ITSE_{reg}(\boldsymbol{\theta}), ITSE_{servo}(\boldsymbol{\theta}), TVU_{reg}(\boldsymbol{\theta}), TVU_{servo}(\boldsymbol{\theta})] \quad (4.1)$$

El espacio de búsqueda en los cuatro conceptos de diseño, para el proceso de optimización es la siguiente:

$$-\infty \leq ITSE_{reg}, ITSE_{servo}, TVU_{reg}, TVU_{servo} \leq \infty \quad (4.2)$$

y en particular, el espacio de búsqueda para para cada uno de ellos, es como se describe a continuación:

1. El espacio de búsqueda para el concepto de diseño PI

$\theta_{PI} = [k_p, k_i]$ donde:

$$\begin{aligned} -100 &\leq k_p \leq 100 \\ -100 &\leq k_i \leq 100 \end{aligned} \quad (4.3)$$

2. El espacio de búsqueda para el concepto de diseño PwI

$\theta_{PwI} = [k_p, k_i, w_p]$ donde:

$$\begin{aligned} -100 &\leq k_p \leq 100 \\ -100 &\leq k_i \leq 100 \\ -100 &\leq w_p \leq 100 \end{aligned} \quad (4.4)$$

3. El espacio de búsqueda para el concepto de diseño PID

$\theta_{PID} = [k_p, k_i, k_d]$ donde:

$$\begin{aligned} -100 &\leq k_p \leq 100 \\ -100 &\leq k_i \leq 100 \\ -100 &\leq k_d \leq 100 \end{aligned} \quad (4.5)$$

4. El espacio de búsqueda para el concepto de diseño PIDn

$\theta_{PIDn} = [k_p, k_i, k_d, n]$ donde:

$$\begin{aligned} -100 &\leq k_p \leq 100 \\ -100 &\leq k_i \leq 100 \\ -100 &\leq k_d \leq 100 \\ -100 &\leq n \leq 100 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Después de establecer los parámetros y procedimientos para la búsqueda de regiones de estabilidad y el proceso de optimización en general de cada concepto de diseño se procede de manera particular con el concepto de diseño PI.

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI

Para establecer la región de estabilidad del concepto de diseño PI (Ec. 1.9) se parte del control que ha sido propuesto por (Shariati y cols., 2014), el cual tiene los siguientes parámetros: $k_p = 0.6554$, $k_i = 0.0064$. A partir de tales parámetros se establece un espacio inicial de búsqueda más amplio (Tabla 4.3), con el objetivo de encontrar un mayor número de soluciones potenciales que garanticen estabilidad. El proceso anterior se lleva a cabo mediante el Algoritmo 1 (algoritmo de estabilidad) que tiene como objetivo la búsqueda de una zona de soluciones que tengan estabilidad. Esta zona estará constituida por un conjunto de ganancias k_p y k_i que garantizan estabilidad en el sistema. Por ejemplo, en la Figura 4.1, se muestra que la región estable para k_p se encuentra en el intervalo $(10 \leq k_p \leq 100)$ y para k_i de igual forma se encuentra en el intervalo de $(10 \leq k_i \leq 100)$.

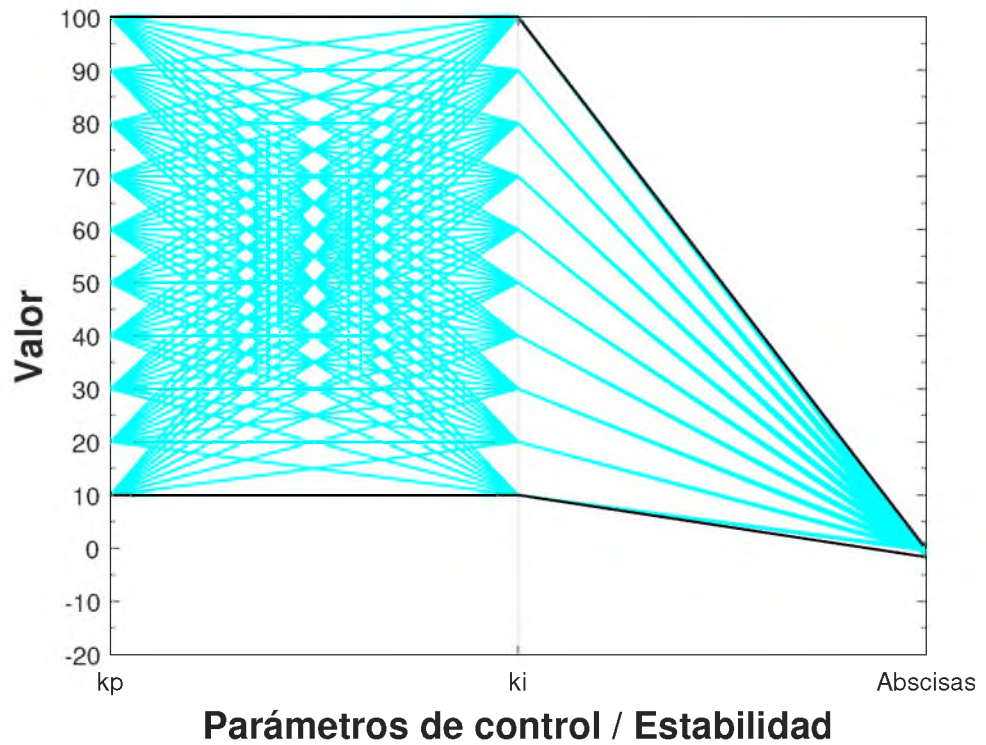


Figura 4.1: Zona de estabilidad para el concepto de diseño PI.

De igual manera se obtiene su correspondiente conjunto de abscisas espectrales estables, asociadas a las ganancias de la región de estabilidad mencionada en el párrafo anterior. El intervalo de abscisas espectrales estables

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI

Algoritmo estabilidad 1						
Concepto de diseño	Espacio inicial de búsqueda β		Zona de estabilidad δ		Zona de Abscisas estables	
	kp	ki	kp	ki	max	min
PI	[-100,100]	[-100,100]	[10,100]	[10,100]	-1.6599	-0.116

Tabla 4.3: Intervalos de espacio de búsqueda inicial, zona de estabilidad, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PI.

se encuentran en un rango de $(-1.6599 \leq Abscisas \leq -0.116)$ como se muestra en la gráfica de superficie (Fig. 4.2) y en la gráfica de contorno (Fig.4.3). Para el análisis e interpretación de estabilidad de dicha figura, puede dividirse en tres zonas: zona 1 $(-1.6 \leq Abscisas \leq -1.4)$, zona 2 $(-0.4 \leq Abscisas \leq -0.2)$ y zona 3 $(-1.2 \leq Abscisas \leq -0.6)$:

- **Zona 1.** En esta zona se puede observar que para los valores máximos de $(80 \leq k_p \leq 100)$ y $(80 \leq k_i \leq 100)$, se encuentran las abscisas espectrales más estables, sus valores están en un intervalo de $[-1.4, -1.6]$.
- **Zona 2.** En esta zona, se puede observar que las ganancias que se encuentran en el intervalo de $(12 \leq k_p \leq 25)$ y $(10 \leq k_i \leq 100)$ se encuentran las abscisas espectrales que se acercan a la inestabilidad, en el orden de $(-0.4 \leq Abscisas \leq -0.2)$.
- **Zona 3.** En esta tercer zona se observa que las ganancias k_p entre $(40 \leq k_p \leq 100)$ y entre $(10 \leq k_i \leq 80)$, existe una región en la cual las abscisas se encuentran alternadas (entre zona1 y zona 2) y se encuentran en el orden de $(-1.2 \leq Abscisas \leq -0.6)$ que también se pueden definir como estables.

4.2.1. Resultados de optimización para el concepto de diseño PI utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE

En la Figura 4.4a, se muestra de manera general los resultados del proceso de optimización. Por ejemplo, se puede observar que las soluciones con mayor estabilidad son las que tienen una abscisa espectral más negativa ($Abscisas = -0.5697$) como se puede observar en dicha Figura y que conforme se van acercando a cero ($Abscisas = -0.1035$) las soluciones son más inestables. Pero también se puede observar que la ganancia que más influye en el control PI, es la ganancia k_p , ya que esta varía entre ($k_p=14.81$ y $k_p=100$) y que conforme esta incrementa su magnitud las soluciones se vuelven más inestables, caso contrario con la ganancia k_i que ésta se mantiene

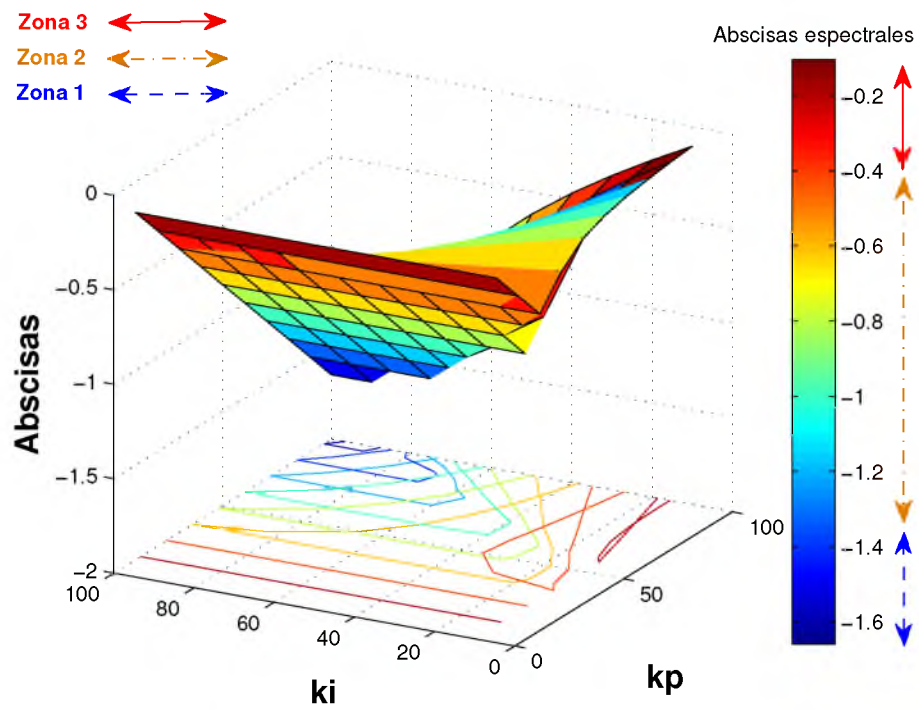


Figura 4.2: Gráfica de superficie formada por k_p , k_i y Abscisas.

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI

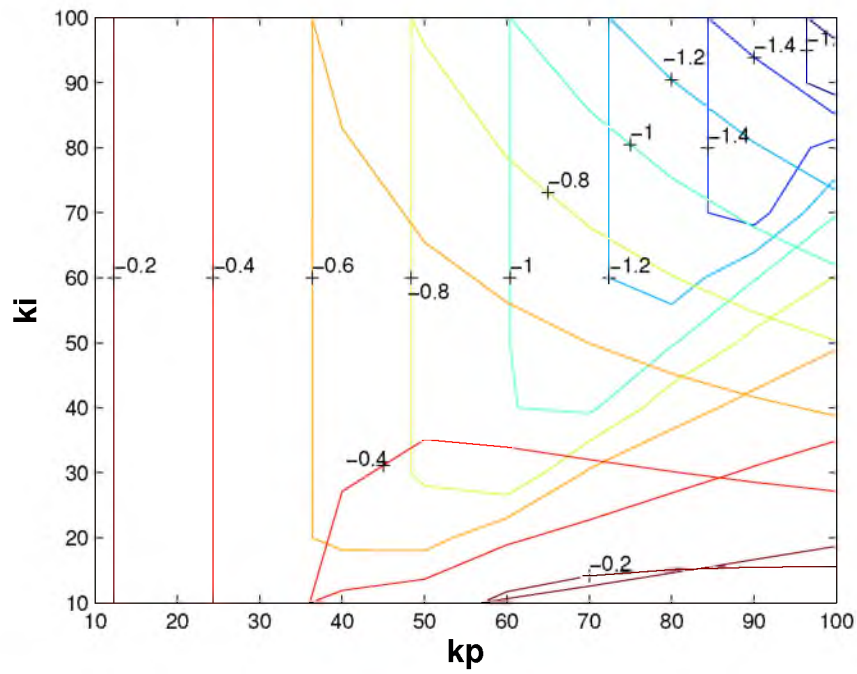


Figura 4.3: Gráfica de superficie, vista k_p vs k_i .

fija en una magnitud de ($k_i = 10$).

En la Figura 4.4b, se muestra más a detalle la relación que existe entre las ganancias k_p y las ganancias k_i . Puede observarse que la magnitud de k_i se mantiene fija y que la magnitud de k_p , es la que varía, por lo que el control estará regido por k_p .

Ahora, en la Figura 4.5a, se puede observar más a detalle la relación entre las ganancias k_p y las abscisas espectrales, por ejemplo, se observa que la máxima estabilidad es alcanzada cuando $k_p = 34.52$, $k_i = 10$, es entonces, también cuando se alcanza solución con mayor estabilidad (Abs=-0.5697).

Finalmente en la Figura 4.5b, se muestra la relación entre las ganancias k_i y las abscisas espectrales y puede observarse con mayor claridad que el valor de la ganancia k_i se mantiene fijo y que las abscisas varían en función del valor de las ganancias k_p .

En la Tabla 4.3 se puede observar los valores del espacio de búsqueda inicial, final y valores máximo y mínimo de las abscisas espectrales obtenidos para el concepto de diseño PI, obtenidos mediante el Algoritmo 1. Todos los valores anteriores proporcionan un indicativo de los límites pertinentes de soluciones estables, que se tomarán como base(población inicial) para el espacio de búsqueda del proceso de optimización.

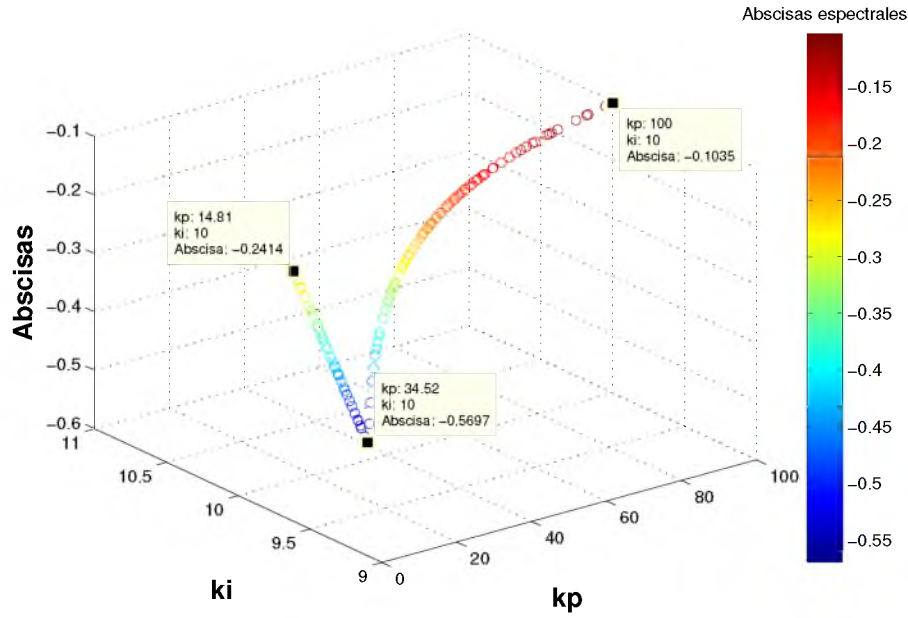
Algoritmo de optimización sp-MODE						
Concepto de diseño	Zona de estabilidad δ		Conjunto de Pareto σ		Intervalo de abscisas estables	
	k_p	k_i	k_p	k_i	min	max
PI	[10,100]	[10,100]	[14.80, 100]	[10,10]	-0.5697	-0.1035

Tabla 4.4: Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PI.

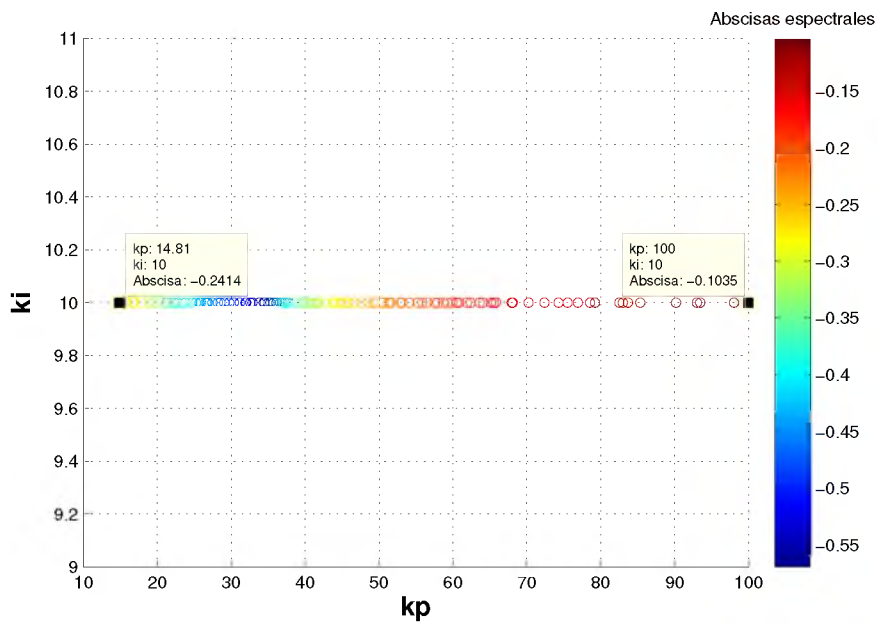
4.2.2. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas

En la Figura 4.6a, que corresponde al frente de Pareto en escala lineal, de manera general no se logra observar una diferencia significativa entre el control tomado como referencia (Shariati y cols., 2014) y los controles propuestos, a excepción de los índices $ITSE_{regulatorio}$ e $ITSE_{servo}$ que sí logra apreciarse una pequeña diferencia en el orden de su magnitud. En cambio en los índices $TVU_{regulatorio}$ y TVU_{servo} no se aprecia de manera clara las diferencias. Por lo tanto, se procede a realizar un análisis pero ahora en escala logarítmica (Fig. 4.6b). Entonces, ya se puede observar claramente que para el índice $ITSE_{regulatorio}$ los resultados obtenidos por optimización en

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI

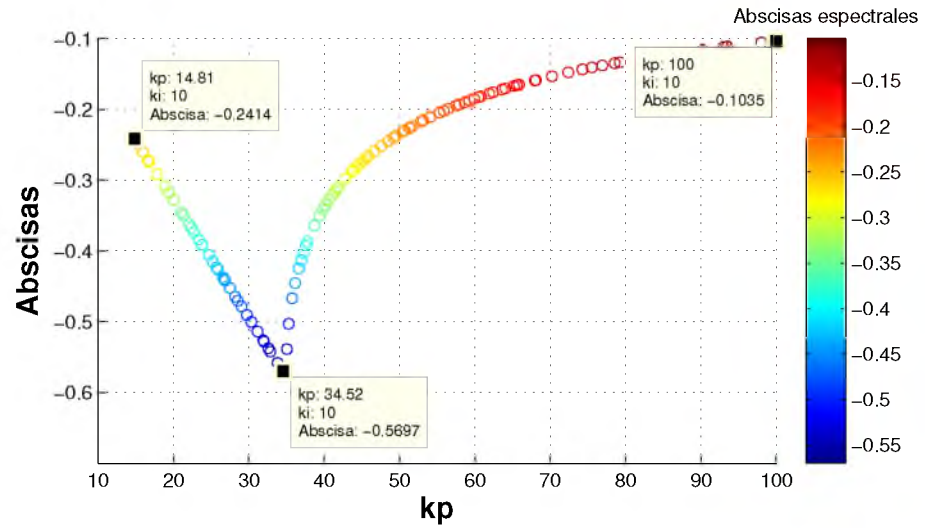


(a) Ganancias k_p vs k_i vs Abscisas.

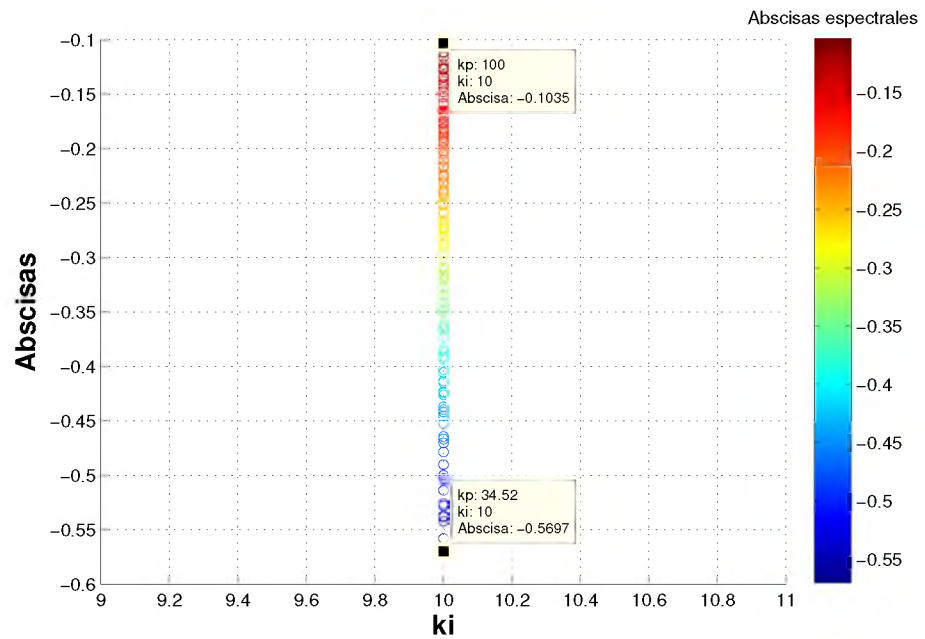


(b) Ganancias k_p vs ganancias k_i .

Figura 4.4: Relación entre ganancias y abscisas espectrales.



(a) Ganancias k_p vs Abscisas.



(b) Ganancias k_i vs Abscisas.

Figura 4.5: Relación entre ganancias y abscisas espectrales.

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI

este trabajo superan (son menores en magnitud) al control tomado de referencia (Shariati y cols., 2014). Para los índices $ITSE_{servo}$ y $TVU_{regulatorio}$ se observa que se tienen valores semejantes (existe cierta coincidencia). Pero también se observa que existen soluciones mayores y menores que el control de referencia. Para el índice TVU_{servo} se observa que el control tomado como referencia supera (menor en magnitud) a las soluciones propuestas.

En este apartado es importante mencionar, que se tiene ventaja entre las soluciones propuestas y la de referencia. Debido a que Shariati y cols. (2014) utiliza el sistema lineal tanto para el diseño como para la evaluación. En cambio para las soluciones propuestas, aprovechando las prestaciones que proporciona la optimización multiobjetivo, el diseño se realizó con el sistema lineal (con el fin de encontrar una zona de estabilidad) pero la optimización (proceso de sintonización) y evaluación se lleva a cabo con el modelo no lineal con el fin de obtener resultados más cercanos al comportamiento de sistema de estudio cuya dinámica es no lineal.

Con el fin de llevar conocer más acerca de la dinámica del sistema. A continuación se lleva un análisis del comportamiento en dominio del tiempo.

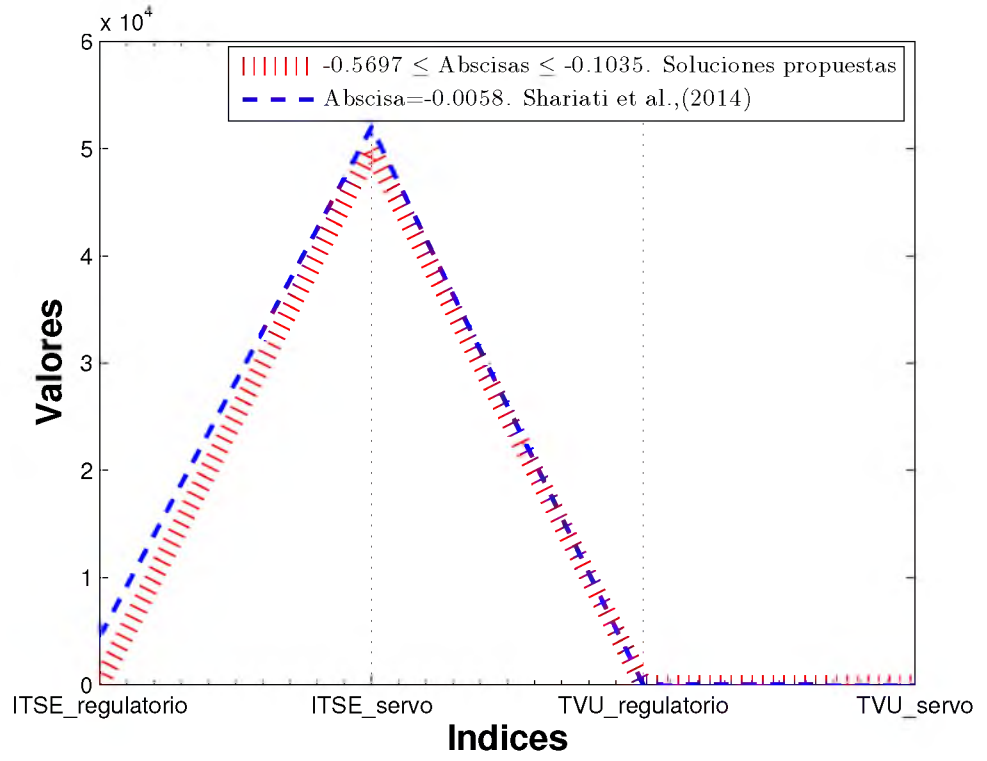
4.2.3. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo

Un análisis más exhaustivo del sistema controlado, se puede realizar mediante la evaluación del comportamiento de la salida del sistema y la señal de control en el escenario regulatorio (Fig. 4.7) y en el escenario servo (Fig. 4.8).

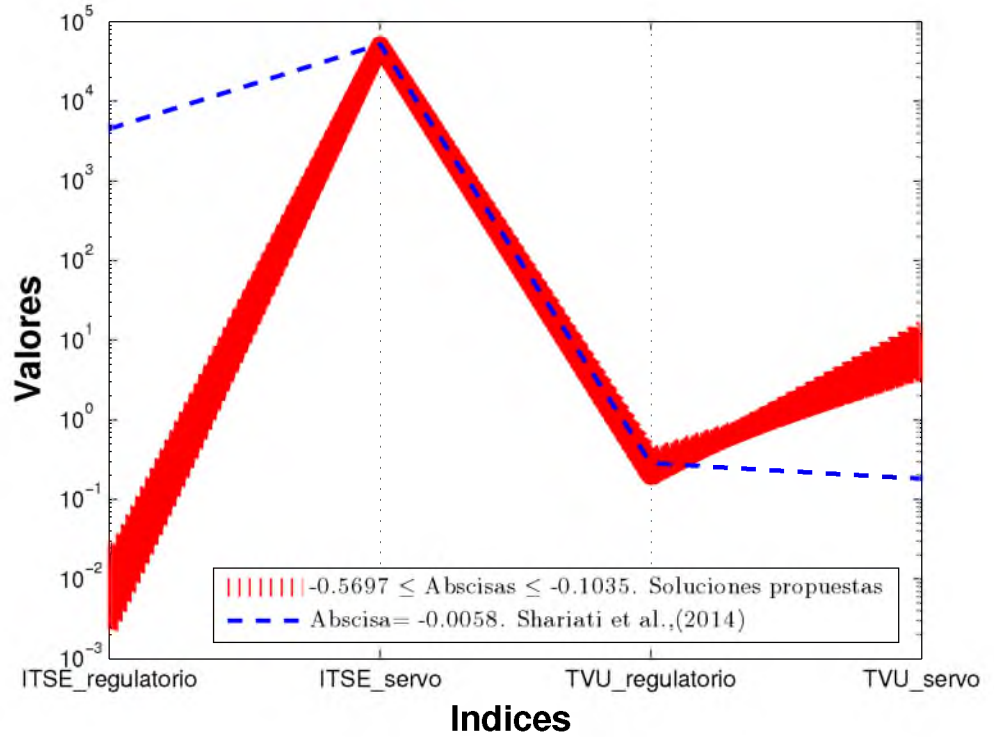
Para la salida del sistema en el escenario regulatorio (Fig. 4.7a), se puede observar que con el control tomado como referencia (Shariati y cols., 2014), (línea punteada) tiene un mayor sobresalto así como también tiene un tiempo de asentamiento lento, aproximadamente de 500 segundos. En tanto que los controles obtenidos en éste trabajo (línea sólida) muestran un sobresalto pequeño y estabilizan al sistema en un tiempo menor.

En este mismo sentido, se puede corroborar los resultados obtenidos en simulación con el frente de Pareto que se muestra en la Figura 4.6b. Por ejemplo, se puede observar que la magnitud del índice $ITSE_{regulatorio}$ de los controles propuestos es menor que la magnitud del índice $ITSE_{regulatorio}$ del controlador utilizado como referencia.

Ahora bien, con respecto a la señal de control (Fig. 4.7b) también en el escenario regulatorio visualmente se observa que la señal de control propuesta por Shariati y cols. (2014) es muy suave y tarda en estabilizarse. Mientras que los controles que se proponen, aunque muestran un control más agresivo



(a) Frente de Pareto sin normalizar, concepto de diseño PI en escala lineal.



(b) Frente de Pareto sin normalizar, concepto de diseño PI en escala logarítmica.

Figura 4.6: Frentes de Pareto en coordenadas paralelas.

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI

logran estabilizar y controlar más rápidamente el sistema.

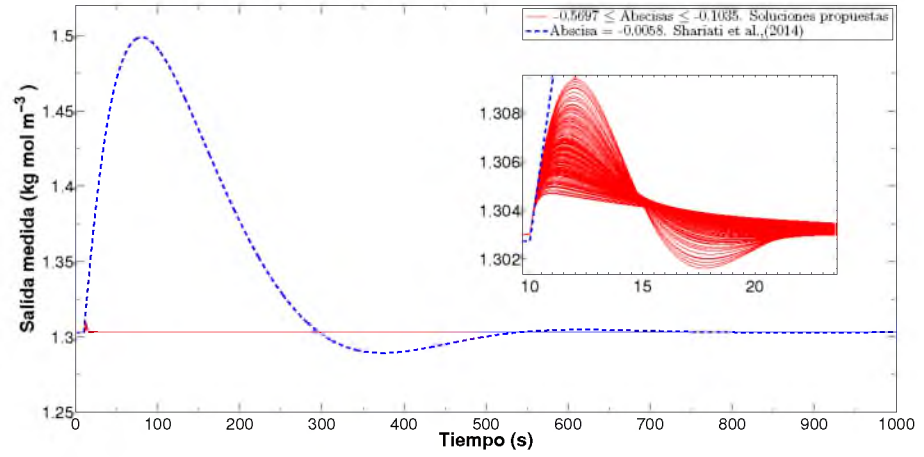
Por otro lado, haciendo una evaluación numérica y apoyándose en el frente de Pareto (Fig. 4.6 b) se observa que el comportamiento de las señales de control, tanto para los controladores propuestos como el control tomado de referencia, el índice $TVU_{regulatorio}$ tiene un comportamiento similar.

Para la salida del sistema en escenario servo (Fig. 4.8 a), visualmente se puede apreciar que el control tomado como referencia (Shariati y cols., 2014) y los controles propuestos en este trabajo muestran la salida del sistema con un sobresalto similar, pero también puede observarse que la salida del control de referencia muestra un tiempo de asentamiento más tardado, aproximadamente de 600 segundos, mientras que los controles propuestos en este trabajo muestran un menor sobresalto y un tiempo de asentamiento más rápido, aproximadamente de 70 segundos.

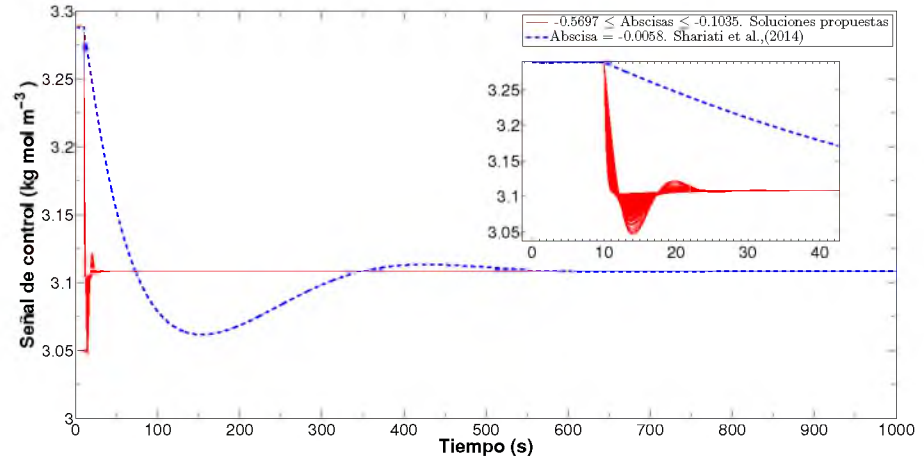
Realizando una evaluación numérica. Los resultados descritos en el párrafo anterior pueden verificarse mediante el comportamiento del frente de Pareto (4.6 b), en este caso, se puede observar que la magnitud del error para el índice $ITSE_{servo}$, es similar tanto para el control tomado de referencia (Shariati et al.,(2014) como de los controles propuestos en este trabajo.

Con respecto a la señal de control en el escenario servo (Fig. 4.8 b), puede observarse que la señal de control propuesta por Shariati y cols. (2014) necesita poca energía para estabilizar el sistema, mientras que los controles propuestos en este trabajo muestran una señal muy sensible a ruido y necesitan mayor energía para estabilizar dicho sistema.

Ahora bien, apoyándose en el frente de Pareto (Fig. 4.6 b), mediante el índice TVU_{servo} , puede observarse que el control propuesto por Shariati y cols. (2014) es menor en magnitud que los controles propuestos en este trabajo.



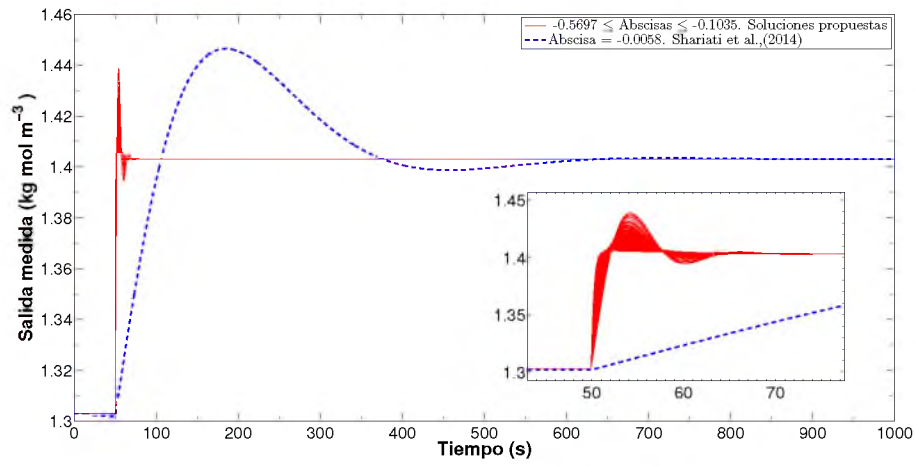
(a) Salida del sistema: Control propuesto (línea sólida), Shariati et al.,(2014) (- -).



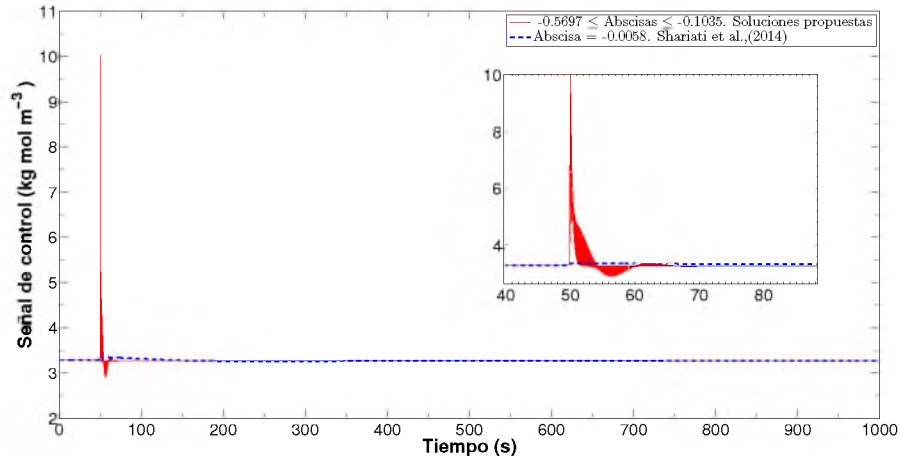
(b) Señal de control: Control propuesto (línea sólida), Shariati et al.,(2014) (- -).

Figura 4.7: Salida del sistema y señal de control, del sistema no lineal para el concepto de diseño PI. Escenario regulatorio.

4.2. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PI



(a) Salida del sistema: Control propuesto (línea sólida), Shariati et al.,(2014) (- -).



(b) Señal de control: Control propuesto (línea sólida), Shariati et al.,(2014) (- -.)

Figura 4.8: Salida del sistema y señal de control del sistema no lineal, para el concepto de diseño PI. Escenario servo.

4.3. Concepto de diseño PwI

4.3.1. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PwI

Para establecer la región de estabilidad del concepto de diseño PwI (Ec. 1.8) se parte del control propuesto por (Sree y Chidambaram, 2003b), el cual tiene como parámetros $k_p = 1.24$, $k_i = 0.0127$ y $w = 0.1517$. Ahora bien, tomando como base los anteriores parámetros de control se procede a ampliar el espacio de búsqueda (Tabla 4.5) para cada uno de ellos, con fin de encontrar y asegurar una zona estable, de modo que se obtenga un conjunto de soluciones que garanticen estabilidad para el sistema. El proceso anterior se lleva a cabo mediante un Algoritmo (1), el cual tiene como objetivo obtener soluciones estables a partir de los eigenvalores de la matriz característica. Por lo tanto la zona de estabilidad estará compuesta por ganancias k_p , k_i w que garantizan soluciones estables (Fig. 4.9)

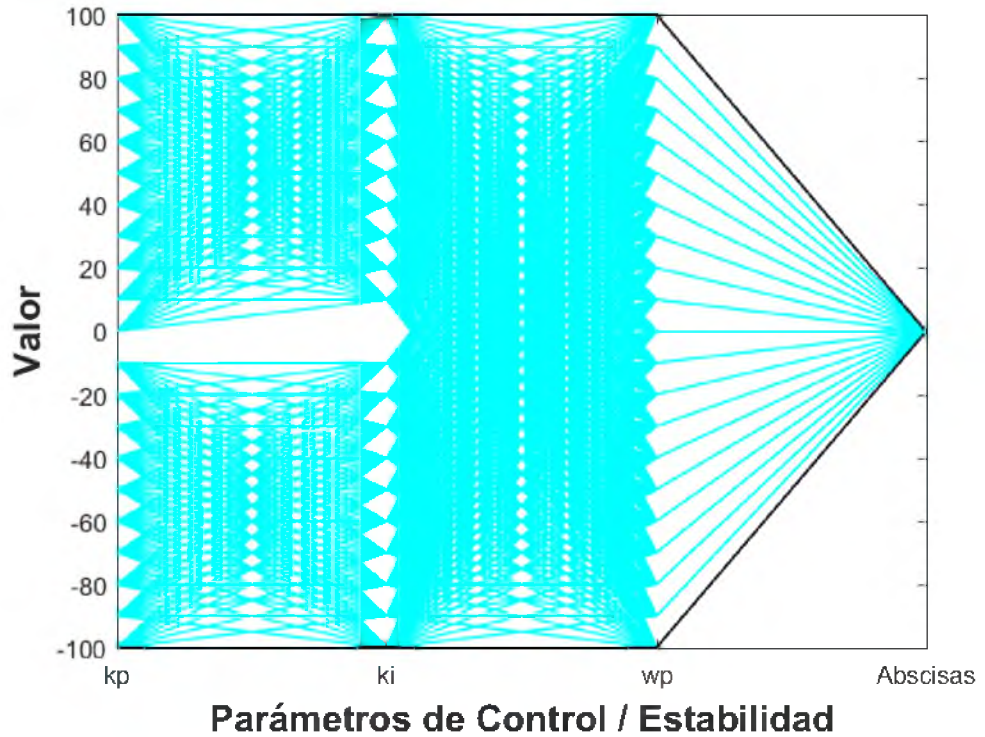


Figura 4.9: Zona de estabilidad para el concepto de diseño PwI.

4.3. Concepto de diseño PwI

Algoritmo de Estabilidad 1								
Concepto de diseño	Espacio inicial de búsqueda β			Zona de estabilidad δ			Zona de abscisas estables	
	k_p	k_i	w_p	k_p	k_i	w_p	min	max
PwI	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	-1.6599	-0.116

Tabla 4.5: Espacio inicial de búsqueda, zona de estabilidad, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PwI.

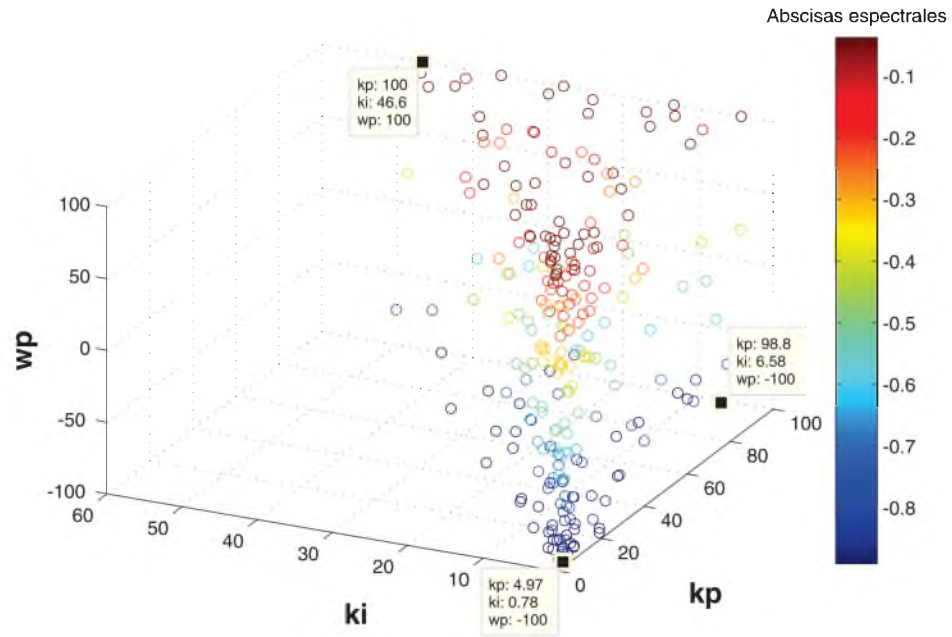
4.3.2. Resultados de optimización para el concepto de diseño PwI utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE

Después de haber obtenido los resultados de la región de estabilidad con sus respectivas ganancias(parámetros) de control e intervalo de abscisas espectrales estables, se da inicio al proceso de optimización mediante el algoritmo evolutivo multiobjetivo sp-MODE (Reynoso-Meza, 2010) tomando como datos de entrada (población inicial) los datos de la zona de estabilidad (Tabla 4.5). Durante el proceso de optimización el algoritmo buscará las mejores prestaciones entre los diferentes objetivos (Ec. 4.1) que se desean optimizar.

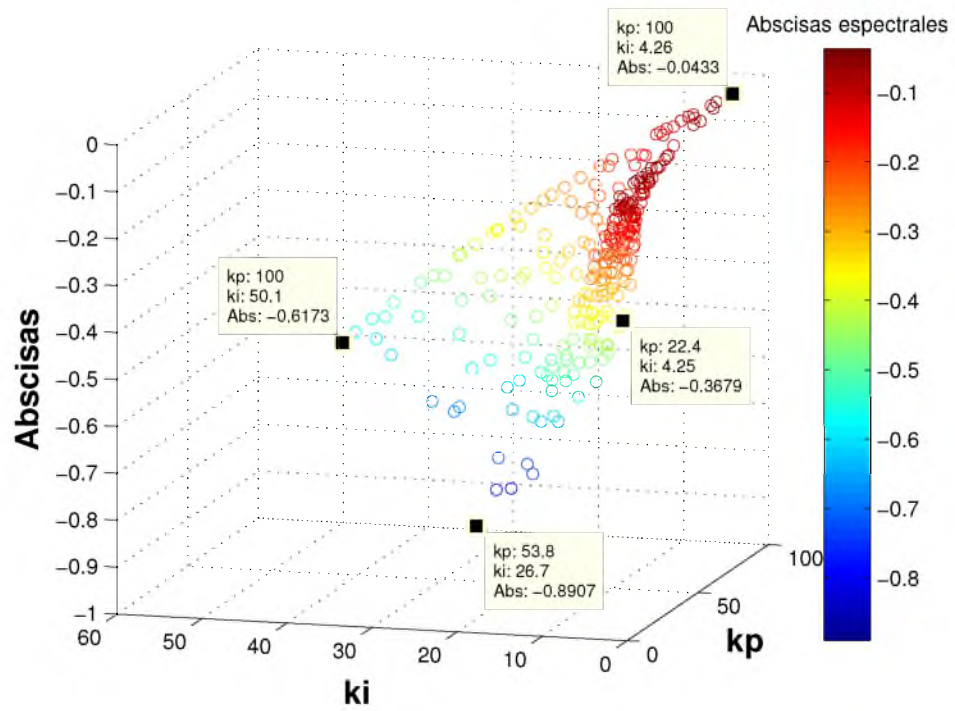
Al terminar el proceso de optimización se obtiene un conjunto de soluciones óptimas, llamado conjunto de Pareto (Tabla 4.6) y (Fig. 4.10a) que está formado por los parámetros de control k_p , k_i y w_p , pero además están asociados a un conjunto de abscisas espectrales las cuales indican el grado de estabilidad, siendo más estables las más negativas (-0.8, en color azul) y menos estables las que se van acercando a -0.1 (en color rojo) como se observa en la barra lateral de abscisas espectrales de la Figura 4.10a.

La manera o la forma de conocer que tan estables o inestables son las soluciones obtenidas, es mediante un análisis de relación entre k_p , k_i y w_p , con sus respectivas abscisas espectrales. El análisis se explica en las siguientes Figuras (4.10b y 4.11).

En la Figura 4.10b, se muestra la relación entre las ganancias k_p , k_i y las abscisas espectrales. Como se mencionó en un párrafo anterior, la estabilidad estará determinada por la abscisa espectral, entonces, la solución más estable es la que tiene las ganancias de $k_p = 53.8$, $k_i = 26.7$ y *abscisa* = -0.8907 y la menos estable es la solución que tiene las ganancias $k_p = 100$, $k_i = 4.26$ *abscisa* = -0.0433. También se puede observar que la ganancia k_i su intervalo de operación es más pequeño ($26.7 \leq k_i \leq 50.1$) mientras que la ganancia k_p tiene un intervalo más amplio ($53.8 \leq k_p \leq 100$) y muestra una mayor influencia en el control.



(a) Ganancias k_p vs k_i vs w_p .



(b) Ganancias k_p vs k_i vs Abscisas.

Figura 4.10: Relación entre parámetros de control y Abscisas espectrales.

En la Figura 4.11a, se puede observar que la ganancia k_p y la ponderación que corresponde a la ganancia w_p tienen una distribución uniforme, es decir, que no existe tendencia clara de una con respecto a la otra, sin embargo las soluciones están determinadas por la estabilidad, por ejemplo, la solución más estable es la que tiene las ganancias $k_p = 48$, $w_p = -100$ y $abscisa = -0.7991$ y la menos estable es la que tiene las ganancias $k_p = 100$, $w_p = 100$, $abscisa = -0.0433$.

Por otro lado, en la Figura 4.11b se puede observar la relación entre las ganancias k_i , w_p y las abscisas espectrales. Por ejemplo, se observa que la solución más estable es cuando $k_i = 23.4$, $w_p = -100$ y $abscisa = -0.7991$ y la solución menos estable es cuando se tienen las siguientes ganancias $k_i = 0.271$, $w_p = 100$ y $abscisa = -0.03774$. En esta misma figura se observa que la ganancia w_p tiene mayor influencia sobre el control.

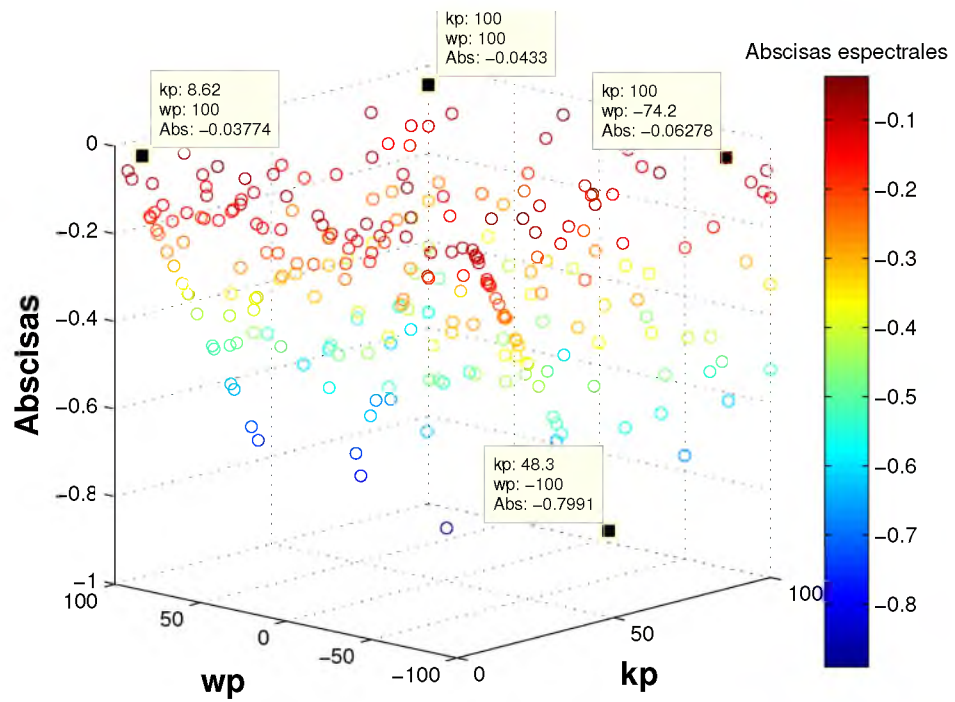
Algoritmo de optimización sp-MODE								
Concepto de diseño	Zona de estabilidad β			Conjunto de Pareto σ			Intervalo de abscisas estables	
	k_p	k_i	w_p	k_p	k_i	w_p	min	max
PwI	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[4.11,100]	[0.16,50.10]	[-100,100]	-0.8907	-0.0370

Tabla 4.6: Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores máximos y mínimos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PwI.

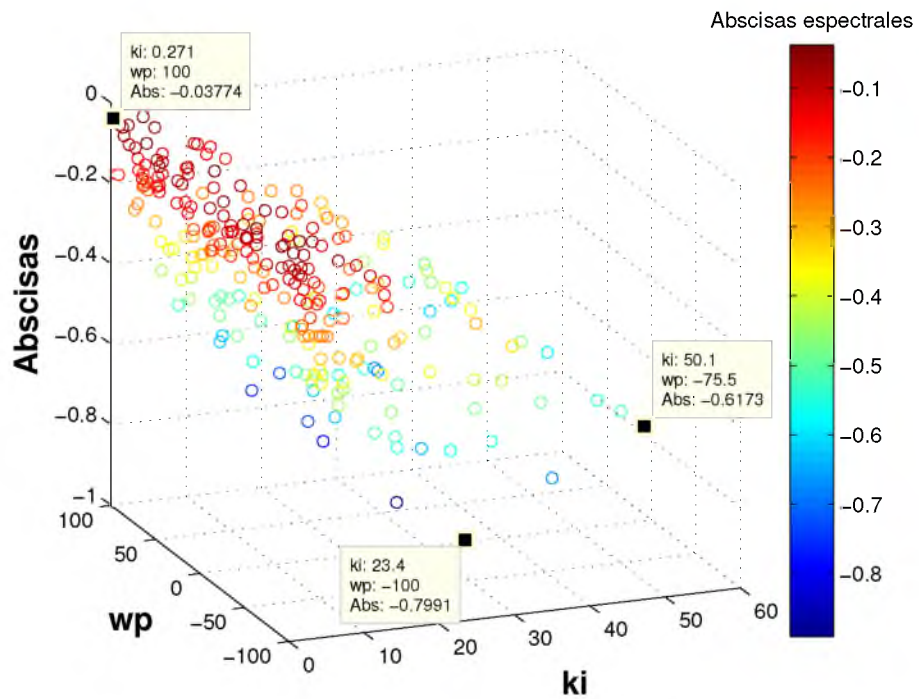
4.3.3. Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PwI

Examinando con más detalle el conjunto de Pareto (Fig. 4.10), ahora se realiza un análisis mediante coordenadas Paralelas (Fig. 4.12). En esta figura se muestra la interrelación entre los diferentes parámetros de control (k_p , k_i , w_p). Para hacer una mayor distinción se han clasificado en tres principales categorías, tomando como base la abscisa espectral de cada solución. Entonces, es así que las soluciones caracterizadas en color azul (Fig. 4.13a) con abscisas espectrales en el rango de $(-0.8 \leq abscisas \leq -0.51)$ representan las soluciones más estables. Las soluciones en color verde (Fig. 4.13b) con abscisas espectrales entre $(-0.5 \leq abscisas \leq -0.26)$ representan soluciones con menor estabilidad que las soluciones de color azul. En tanto que las soluciones caracterizadas en color rojo (Fig. 4.13 c) con abscisas espectrales en un rango de $(-0.25 \leq abscisas \leq -0.0370)$ representan soluciones con muy poca estabilidad y algunas de ellas se encuentran al borde de ser inestables.

En la Figura 4.13a, se muestran las soluciones con mayor estabilidad en comparación con el conjunto de soluciones de las Figuras 4.13b y 4.13c. Sus abscisas espectrales se encuentran en un intervalo de: $(-0.8 \leq abscisas \leq$



(a) Ganancias k_p vs w_p vs Abscisas.



(b) Ganancias k_i vs w_p vs abscisas.

Figura 4.11: Relación entre parámetros de control y Abscisas espectrales.

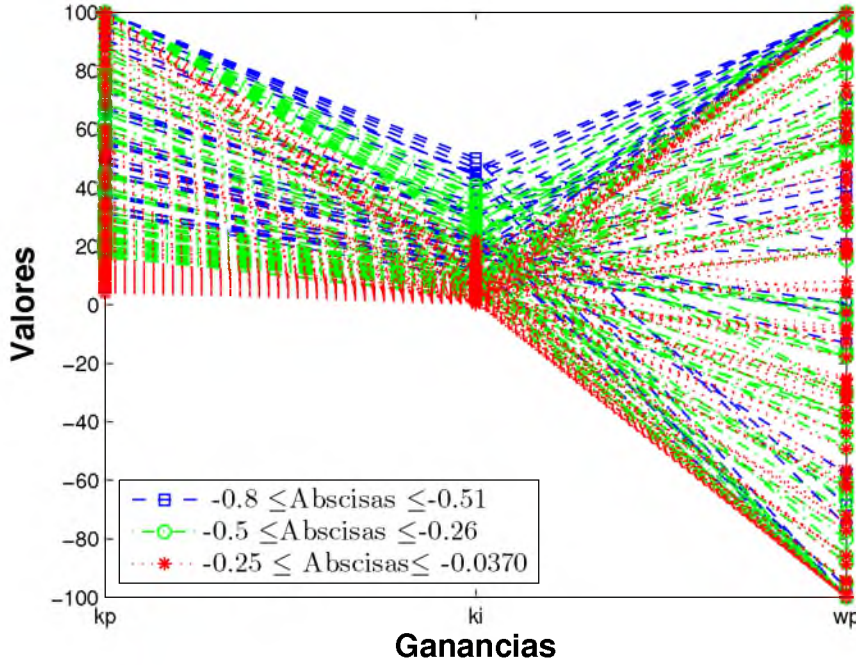


Figura 4.12: Coordenadas Paralelas, frente de Pareto, concepto de diseño PwI.

-0.51) y sus respectivos parámetros de control corresponden a: $(31.10 \leq kp \leq 100)$, $(8.91 \leq ki \leq 50.1)$ y $(-100 \leq wp \leq 100)$.

En la Figura 4.13b, se muestran las soluciones con un grado intermedio de estabilidad en relación las soluciones de las Figuras 4.13a y 4.13c. Sus abscisas espectrales se encuentran en un rango de $(-0.5 \leq abscisas \leq -0.26)$ y cuyos intervalos de control están determinados por $(16.10 \leq kp \leq 100)$, $(2.46 \leq ki \leq 40.9)$ y $(-100 \leq wp \leq 100)$.

Finalmente, en la Figura 4.13c, se muestra un conjunto de soluciones cuyas abscisas espectrales oscilan entre $(-0.25 \leq abscisas \leq -0.0370)$ y sus parámetros de control se encuentran en el siguiente rango: $(6 \leq kp \leq 100)$, $(2.39 \leq ki \leq 22.1)$ y $(-100 \leq wp \leq 100)$ pero que muestran muy poca estabilidad en relación con el conjunto de soluciones de las Figuras 4.13a y 4.13b.

En general se puede observar que para las tres regiones mostradas en las Figs. 4.13a, 4.13b, 4.13c, la ganancia w_p comparte el mismo intervalo en magnitud $(-100 \leq wp \leq 100)$, pero también se observa mayor cantidad de soluciones a lo ancho del intervalo con más baja estabilidad (Fig. 4.13c), mientras que para las soluciones con una estabilidad intermedia (Fig. 4.13b)

aunque abarcan el mismo intervalo es menor el número de soluciones. En tanto que para las soluciones con mayor estabilidad (Fig. 4.13a) la mayoría de los valores de w_p se localizan en límite inferior ($w_p = -100$) y en el límite superior ($w_p = 100$) y muy pocas soluciones aparecen en la parte intermedia de dicho intervalo.

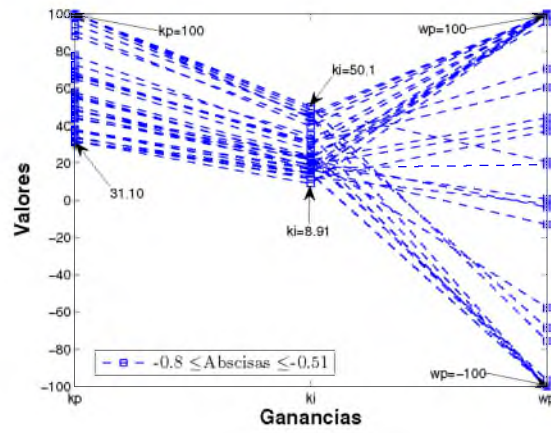
Para la ganancia k_i en las Figuras 4.13b, 4.13c, se observa que el límite inferior es semejante ($k_i \approx 2.39$). Mientras que el límite superior es diferente, por ejemplo, se puede observar que límite superior de la ganancia k_i de Figura 4.13b (conjunto de soluciones con estabilidad intermedia) es mayor que el límite superior de la Figura 4.13c (conjunto de soluciones con poca estabilidad). Por otro lado, para las soluciones con mayor estabilidad (4.13a), tanto el límite inferior ($k_i = 8.91$) como el límite superior ($k_i = 50.1$) es mayor con respecto a las Figuras 4.13b y 4.13c, por lo se puede inferir que entre mayor es valor de la ganancia k_i , es mayor la estabilidad en las soluciones.

Para la ganancia k_p , el intervalo ($-6 \leq k_p \leq 100$) del conjunto de soluciones con poca estabilidad (Fig. 4.13c) es mayor que el intervalo ($16.10 \leq k_p \leq 100$) del conjunto de soluciones con estabilidad intermedia (Fig. 4.13b) y a su vez, el intervalo ($31.10 \leq k_p \leq 100$) que corresponde al conjunto de soluciones con mayor estabilidad (Fig. 4.13a) es menor que los dos anteriores (Fig. 4.13b y 4.13c). Algo que se puede observar en estas tres regiones anteriormente establecidas (azules, verdes y rojas), es que la ganancia k_p alcanza siempre su valor máximo (límite superior) habiendo solo variación en su límite inferior. Y analizando con más detalle cada una de las figuras, se observa que el parámetro que define la estabilidad en cada región es k_i , ya que entre menor es la estabilidad, los valores de k_i son menores como se puede observar en la misma figura 4.13.

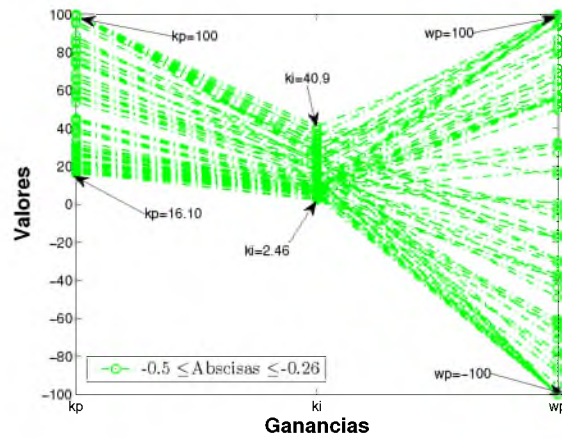
4.3.4. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PwI

El frente de Pareto (Fig. 4.14) en coordenadas paralelas nos permite observar a detalle la forma en que se relacionan los índices ITSE y TVU tanto para el escenario regulatorio como para el escenario servo. Para ello, el frente de Pareto se ha dividido en 3 tres principales grupos, tomando como base a su abscisa espectral. El primer grupo (color azul) representa al conjunto de soluciones más estables y corresponde a un intervalo de abscisas espectrales ($-0.8 \leq abscisas \leq -0.51$). El segundo grupo (color verde) corresponde al conjunto de soluciones con una estabilidad intermedia ($-0.5 \leq abscisas \leq -0.26$) y el tercer grupo (color rojo) representa al conjunto de soluciones con poca estabilidad ($-0.25 \leq abscisas \leq -0.0370$). También, en la misma Figura 4.14 se encuentra representada en color ne-

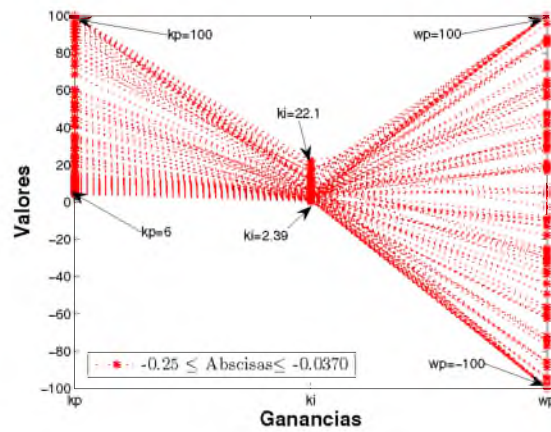
4.3. Concepto de diseño PwI



(a) Soluciones que representan mayor estabilidad.



(b) Soluciones que representan estabilidad intermedia.



(c) Soluciones que representan poca estabilidad.

Figura 4.13: Análisis del conjunto de Pareto para el concepto de diseño PwI.

gro la solución tomada de referencia (Sree y Chidambaram, 2003b) y cuya abscisa espectral tiene un valor de -0.0155 , y se encuentra al borde de ser inestable.

En la Figura 4.15 se hace un acercamiento más a detalle la Figura 4.14 y se puede observar lo siguiente:

- Para el $ITSE_{regulatorio}$ la solución que sirve de referencia tiene un comportamiento semejante a una solución obtenida por la optimización (valor más alto normalizado a 1), en comparación con la gran mayoría de soluciones obtenidas que tiene un valor normalizado entre 0.0 y 0.4.
- Para $ITSE_{servo}$ todas las soluciones obtenidas generadas por la optimización presentan un rango normalizado de 0.2 a 1.0 a diferencia de la solución propuesta por Sree y Chidambaram (2003b), el cual presenta un valor mínimo.
- Para $TVU_{regulatorio}$ el conjunto de soluciones obtenidas en optimización va de 0.0 a 1.0 (en un rango normalizado) y el propuesto por Sree y Chidambaram (2003b) tiene un valor cercano a 0.2.
- Para TVU_{servo} las soluciones obtenidas por optimización tiene un valor entre 0.0 y 1.0. A diferencia del valor propuesto por Sree y Chidambaram (2003b) que tiene un valor cercano al mínimo.

Las soluciones obtenidas por la optimización presentan mayor diversidad en los índices TVU_{servo} , $TVU_{regulatorio}$ en menor medida el $ITSE_{servo}$ y mucho menor en $ITSE_{regulatorio}$.

Se observa que en el control propuesto por Sree y Chidambaram (2003b) sus índices ($ITSE_{servo}$ y TVU_{servo}) son menores que los obtenidos por optimización. Para el caso $TVU_{regulatorio}$ con el propuesto por Sree y Chidambaram (2003b) puede tener un comportamiento semejante por una solución obtenida por optimización.

La solución propuesta por Sree y Chidambaram (2003b) en los índices $ITSE_{servo}$, $TVU_{regulatorio}$ y TVU_{servo} alcanzan un valor maximo normalizado de 0.2, mientras que el indice $ITSE_{regulatorio}$ presenta el valor maximo normalizado, por lo tanto, en base al valor de su abscisa de -0.0155 este control está muy cerca de ser inestable. Principalmente se observa la influencia que tiene la abscisa espectral en el índice $ITSE_{regulatorio}$, por lo tanto, este control propuesto por Sree y Chidambaram (2003b) podría ser muy sensible ante entradas exógenas.

Entonces, de manera general se puede deducir que entre mayor sea la estabilidad, se tendrán índices altos (en magnitud) para el escenario regulatorio, por el contrario entre menor sea la estabilidad se tendrán índices menores también en magnitud para el escenario servo.

Después haber analizado del intercambio de prestaciones entre los diferentes índices (Fig. 4.14) mediante el uso de coordenadas paralelas, se lleva a cabo un proceso de evaluación numérica de las soluciones obtenidas por optimización en éste trabajo y la solución tomada de referencia (Sree y Chidambaram, 2003b).

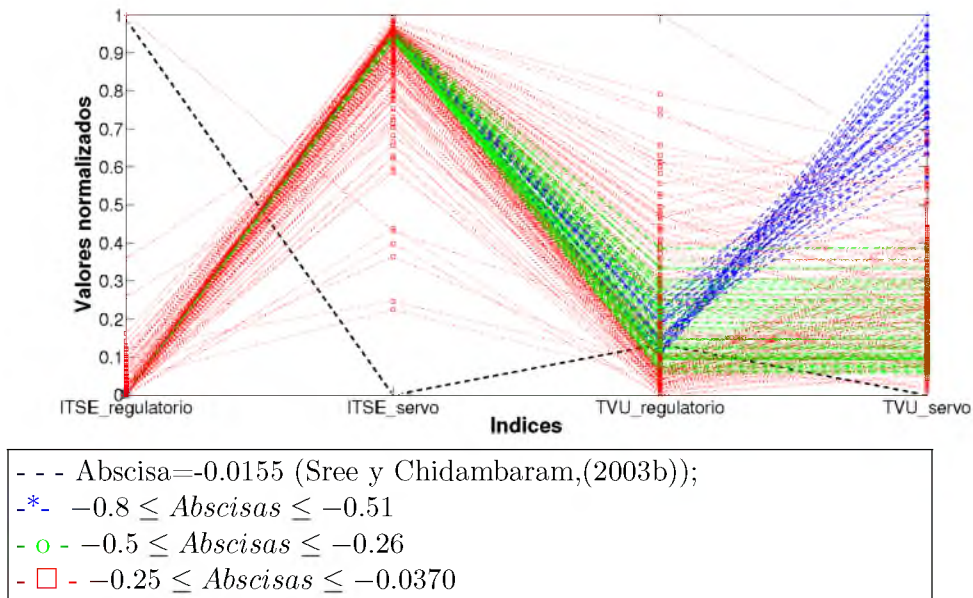


Figura 4.14: Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PwI.

4.3.5. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PwI

Se puede llevar a cabo un análisis más detallado del sistema en el dominio del tiempo a partir del comportamiento de la salida del sistema y de la señal de control tanto para el escenario regulatorio (Fig. 4.16) como para el escenario servo (4.17).

Para la salida del sistema en el escenario regulatorio (Fig. 4.16a) se puede observar que la señal del control tomado de referencia (Sree y Chidambaram,

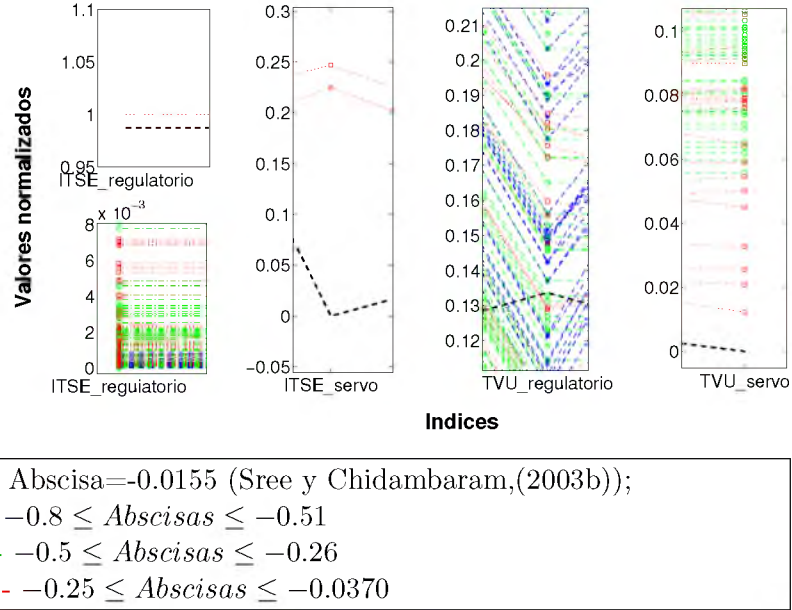


Figura 4.15: Vista a detalle de la Fig. 4.14 con valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PWI.

2003b) (línea punteada en color negro), tiene un mayor sobresalto, así como también tiene un tiempo de asentamiento lento aproximadamente de 300 segundos, por el contrario el conjunto de soluciones obtenidas por optimización en este trabajo, muestran un sobresalto y un tiempo de asentamiento mucho menor que el que se utiliza de comparativo, aproximadamente en un rango entre 70 y 100 segundos.

En esta misma Figura 4.16a, se ha realizado un acercamiento para observar más a detalle el comportamiento de la salida ante diferentes parámetros de control y se puede apreciar que las soluciones que tienen mayor estabilidad (color azul) y cuyas abscisas espectrales se encuentran en el rango ($-0.8 \leq \text{abscisas} \leq -0.51$) tienen un sobresalto mucho menor.

En contraparte la salida para el control propuesto por Sree y Chidambaram (2003b) (línea punteada en color negro) tiene un sobresalto y tiempo de asentamiento mayor, debido a que su abscisa espectral tiene un valor de (-0.0155) el cual indica que es una solución con poca estabilidad.

Por lo que se puede inferir que para el escenario regulatorio entre mayor sea la estabilidad se tendrá un menor sobresalto y un menor tiempo de asentamiento.

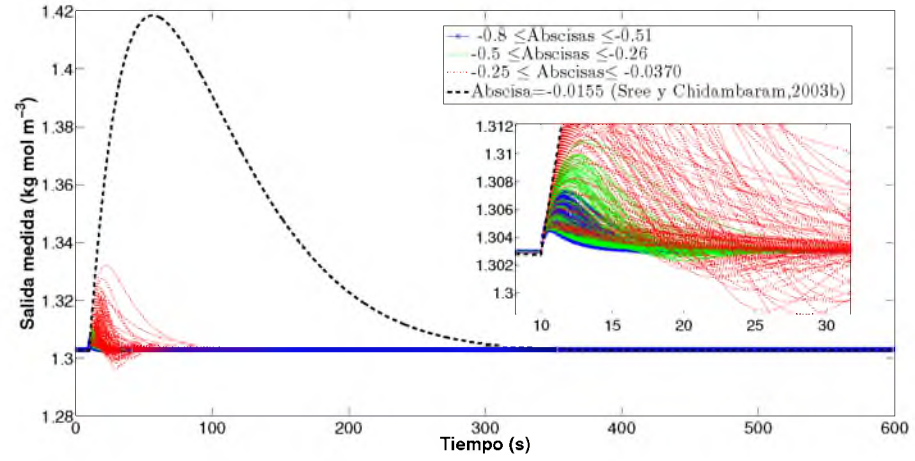
Con respecto a la señal de control también en el escenario regulatorio (Fig. 4.16b) se observa que el control propuesto por (Sree y Chidambaram, 2003b) (y el valor de la abscisa de -0.0155) es muy suave y tarda mucho tiempo en estabilizarse. Mientras que el conjunto de soluciones obtenidas por optimización aunque presentan comportamiento más agresivo se observa que tiempo de estabilización es más rápido. De igual manera, al hacer un acercamiento de dicha figura se logra observar que las soluciones que tienen un abscisa espectral más negativa ($-0.8 \leq \text{abscisas} \leq -0.51$) (soluciones en color azul) logran estabilizar el sistema de manera más rápida en contra parte con la solución propuesta por (Sree y Chidambaram, 2003b).

Ahora bien, con respecto a la señal de salida para el escenario servo (Fig. 4.17a) se observa que la señal de salida obtenida por el control propuesto por (Sree y Chidambaram, 2003b) (líneas punteadas en color negro) tiene un tiempo de asentamiento muy grande (tiempo ≈ 200 segundos) mientras que las soluciones obtenidas por optimización tienen un tiempo de asentamiento menor (tiempo ≈ 100 segundos).

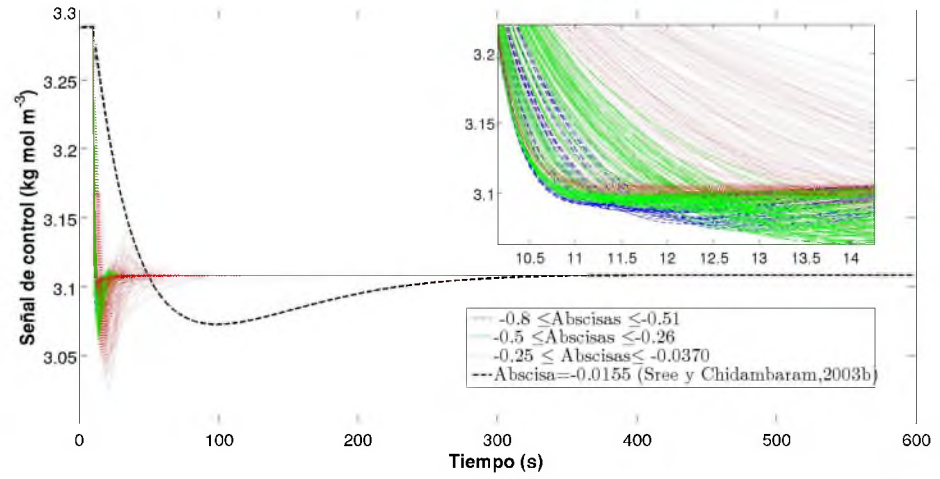
Ahora bien, para la señal de control del escenario servo, se observa que el conjunto de soluciones obtenidas por optimización muestran un comportamiento muy sensible al ruido (Fig. 4.17b), sin embargo, a pesar de ello su tiempo de asentamiento es menor, aproximadamente (tiempo ≈ 80 segundos) en comparación con la señal de control propuesta por Sree y Chidambaram (2003b) que muestra un control suave pero con un gran tiempo de asentamiento (tiempo ≈ 150 segundos).

Este comportamiento se puede visualizar como mayor detalle en el acercamiento (Fig. 4.17 a y b), en las cuales se observa que la señal de control propuesta por (Sree y Chidambaram, 2003b) con una abscisa espectral de $= -0.0155$ alcanza una magnitud de 3.31 aproximadamente su señal de control. En comparación con el conjunto de soluciones obtenidas por optimización (Fig. 4.17b) cuya señal de control llegan a tener una magnitud de 4.5 y con abscisas espectrales en rango de ($-0.8 \leq \text{abscisas} \leq -0.0370$).

Por lo tanto para el escenario servo, se puede observar (Fig. 4.17b) que conforme disminuye la estabilidad de las soluciones (abscisas espectrales más cercanas 0.0) incrementa su tiempo de asentamiento.



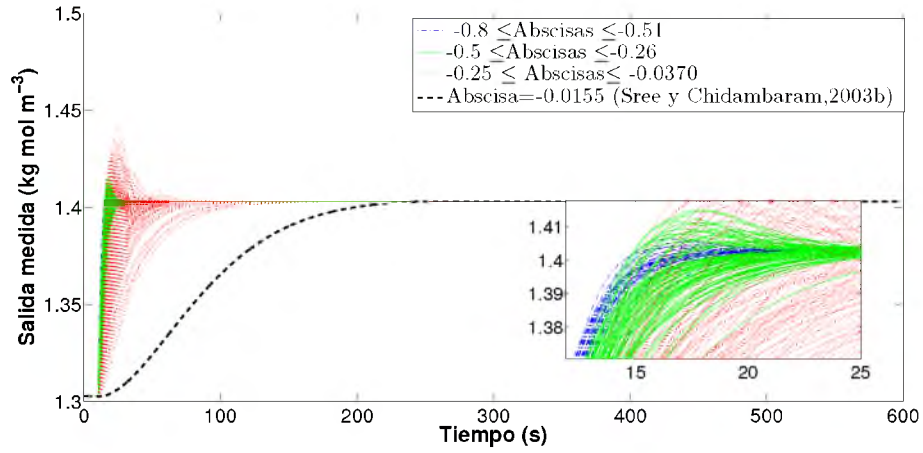
(a) Salida del sistema, mediante un concepto de diseño PwI en escenario regulatorio.



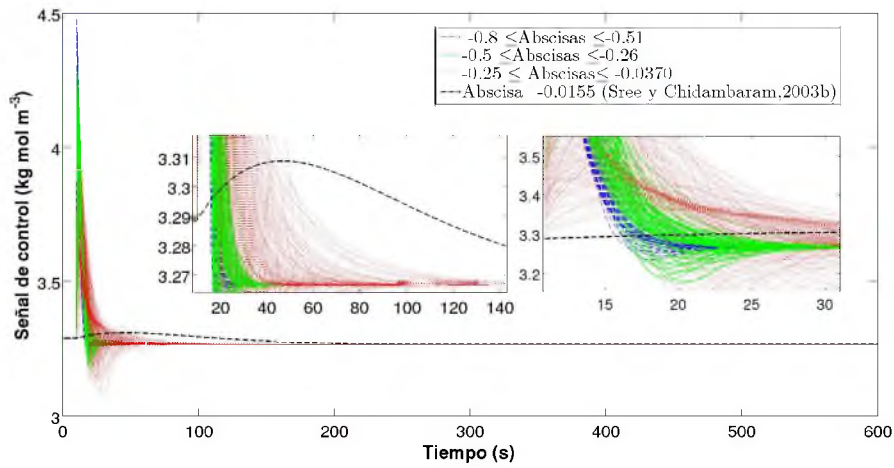
(b) Señal de control, mediante un concepto de diseño PwI en escenario regulatorio.

Figura 4.16: Señal de salida y de control para un concepto de diseño PwI.

4.3. Concepto de diseño PwI



(a) Salidas del sistema, mediante un concepto de diseño PwI en escenario servo.



(b) Señal de control, mediante un concepto de diseño PwI en escenario servo.

Figura 4.17: Salida del sistema y señal de control servo, PwI.

4.4. Concepto de diseño PID

4.4.1. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PID

Para establecer la región de estabilidad del concepto de diseño PID (Ec. 1.7), se parte de la referencia del control propuesto por (Jhunjhunwala y Chidambaram, 2001), el cual tiene como parámetros $k_p = 3.151$, $k_i = 0.058$ y $k_d = 18.464$. Entonces, tomando como base dichos parámetros anteriores se procede a ampliar el espacio de búsqueda (Tabla 4.7) para cada uno de ellos con la finalidad encontrar y asegurar una zona de soluciones estables, de tal manera que garanticen estabilidad para el sistema. El proceso de obtener la zona de soluciones estables se lleva a cabo mediante el Algoritmo 1 que determina la estabilidad a partir de los eigenvalores de la matriz característica. Por lo tanto, la zona de estabilidad estará formada por un conjunto de ganancias k_p , k_i , w_p que garanticen soluciones estables (Fig. 4.18).

Algoritmo de estabilidad 1								
Concepto de diseño	Espacio inicial de búsqueda β			Zona de estabilidad δ			Zona de Abscisas estables	
	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d	min	max
PID	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[10,100]	[0,100]	[-20,100]	-0.9939	-4.45e-17

Tabla 4.7: Espacio inicial de búsqueda, zona de estabilidad, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PID.

4.4.2. Resultados de optimización para el concepto de diseño PID utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE.

Tomando como datos de entrada (población inicial) los datos obtenidos de la zona de estabilidad (Tabla. 4.7), se lleva a cabo el proceso de optimización mediante el algoritmo evolutivo multiobjetivo (Reynoso-Meza, 2010) el cual buscará las mejores prestaciones entre los diferentes objetivos (Ec. 4.1) que se desean optimizar.

Al término del proceso de optimización se obtiene un conjunto de soluciones óptimas, llamado conjunto de Pareto y que está formado por los parámetros de control k_p , k_i , k_d , (Tabla 4.8) y (Fig. 4.19). De manera independiente al proceso de optimización se obtiene la abscisa espectral mínima y máxima asociadas al dicho conjunto de Pareto obtenido que servirán como referencia para establecer zonas de estabilidad. Es importante mencionar también que cada solución tiene su correspondiente abscisa espectral, la cual

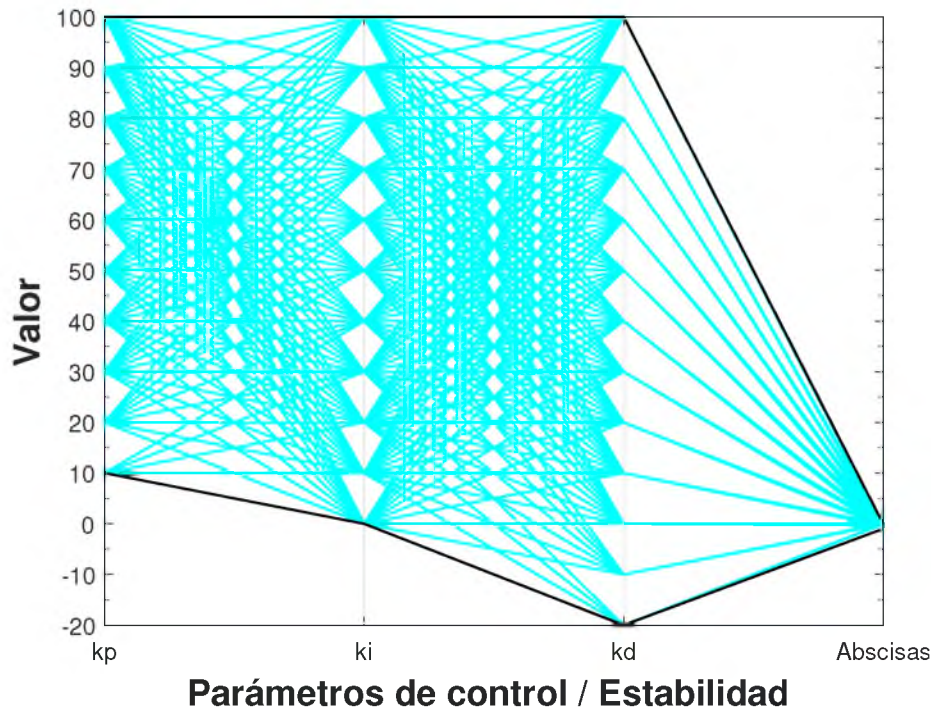


Figura 4.18: Zona de estabilidad para el concepto de diseño PID.

indica el grado de estabilidad.

Algoritmo de optimización sp-MODE							
Concepto de diseño	Zona de estabilidad, δ			Conjunto de Pareto, σ			Intervalo de abscisas estables
	k_p	k_i	w_p	k_p	k_i	w_p	min max
PID	[10, 100]	[0.0, 100]	[-20, 100]	[13.5, 100]	[1.04, 52.19]	[5.18, 100]	-0.9124 -0.0144

Tabla 4.8: Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PID.

Como se ha indicado en el párrafo anterior, la abscisa espectral indicará el grado de estabilidad de las soluciones, entonces, por ejemplo, las más estables serán las que tienen la abscisa más negativa (-0.91, representadas en color azul) y las más inestables serán las soluciones con abscisa cercanas a cero (-0.014, representadas en color rojo) como se muestra en la barra lateral de la Figura 4.19.

Un análisis de la relación entre el conjunto de parámetros k_p , k_i y k_d y su respectiva abscisa espectral, proporcionan información acerca de qué tan

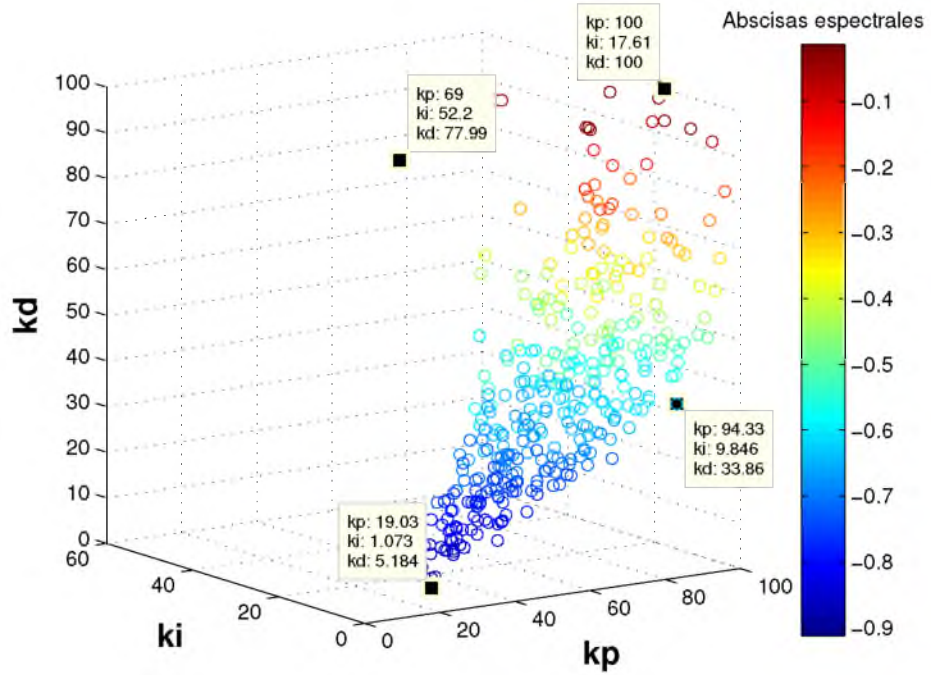


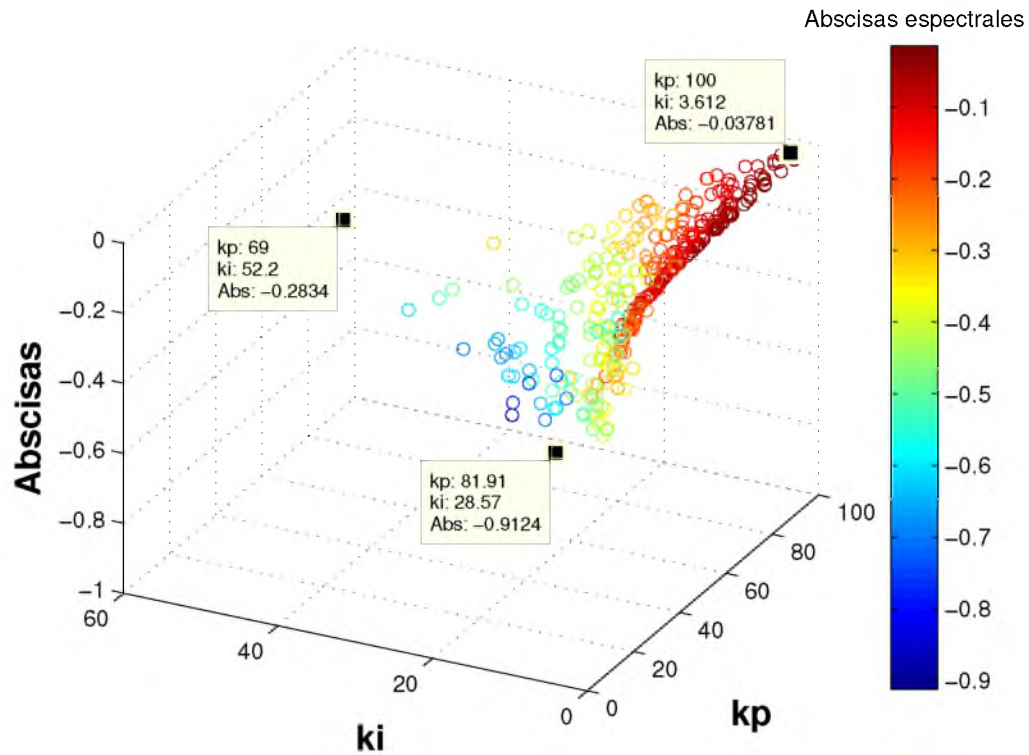
Figura 4.19: Conjunto de Pareto del concepto de diseño PID.

estable o inestable es cada solución. Para ello en las Figuras (4.20, 4.21) se muestra más a detalle dicha relación.

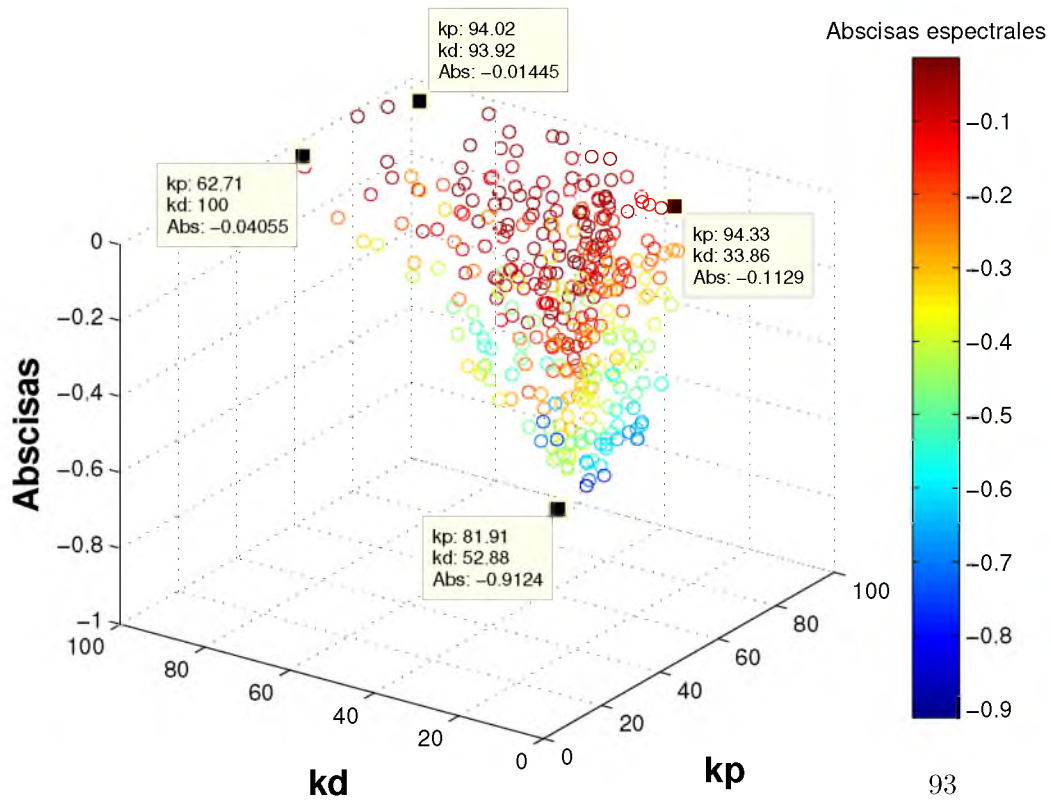
En la Figura 4.20a, se puede observar que la relación entre los parámetros k_p y k_i con respecto a las abscisas, es que existe un dominio del parámetro k_p que varía entre $81.91 \leq k_p \leq 100.00$ en tanto que la variación del parámetro k_i se encuentra en el intervalo de $1.32 \leq k_i \leq 4.68$. Conforme a este comportamiento se observa que la solución más estable se encuentra en la relación de ($k_p = 81.91$, $k_i = 28.57$ y abscisa = -0.9124) y la solución menos estable se encuentra en el rango de ($k_p = 100$, $k_i = 3.61$ y abscisa = -0.037). Por lo anterior, se puede observar que las soluciones menos estables se encuentran cuando los valores de k_i tienden a ser menores y los valores de k_i tienden a su límite superior.

En la Figura 4.20b, se muestra la relación entre los parámetros k_p , k_d y las abscisas espectrales, en dicha figura se puede observar una dispersión con una tendencia hacia los valores máximo de k_p , por ejemplo k_p se encuentra en el intervalo de ($81.91 \leq k_p \leq 94.33$) y k_d se encuentra en el intervalo de ($52.88 \leq k_d \leq 100.0$). Se observa también que la solución más estable se en la relación cuando ($k_p = 81.91$, $k_d = 52.88$ la abscisa= -0.9124) mientras

4.4. Concepto de diseño PID



(a) Ganancias k_p vs k_i vs Abscisas.



(b) Ganancias k_p vs k_d vs Abscisas.

Figura 4.20: Relación entre parámetros de control y Abscisas espectrales.

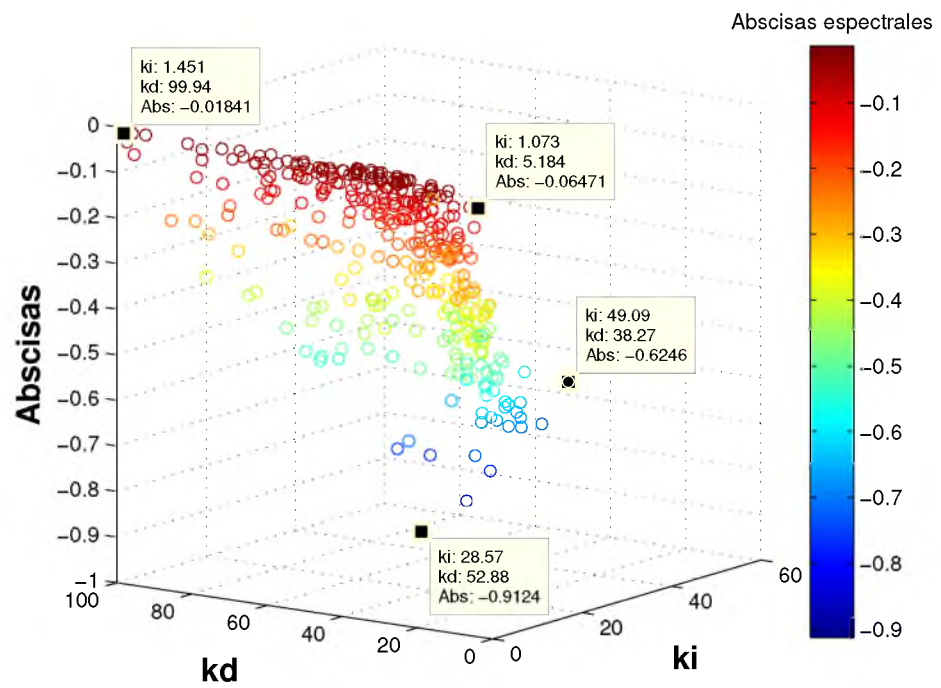


Figura 4.21: Ganancias k_i vs k_d vs abscisas.

que la solución menos estable se encuentra cuando los parámetro de control $k_p = 94.02$, $k_d = 93.92$ y la abscisa espectral tiene el valor de -0.014 . Por lo tanto, se puede apreciar que la inestabilidad de k_p y k_d se encuentra cuando sus valores tienden a sus valores máximos, en contra parte con su estabilidad que se presenta cuando k_p y k_d tienden a sus valores mínimos.

Finalmente, en la Figura 4.21 se observa que la ganancia con menor influencia sobre el control, es la ganancia k_i que se encuentra en un intervalo ($1.073 \leq k_i \leq 49.09$). En tanto que la ganancia con mayor influencia sobre el control es la ganancia k_d que se encuentra en el intervalo ($5.184 \leq k_d \leq 99.94$) como se apreciar. En la misma Figura 4.21 se observa que la tendencia del conjunto de soluciones es hacia la ganancia k_d . La solución más estable en esta relación, se encuentra cuando los parámetros de control $k_i = 28.57$, $k_d = 52.88$ y la abscisa = -0.9124 y la solución menos estable se encuentra cuando $k_i = 1.451$, $k_d = 99.94$ y la abscisa espectral tiene un valor de -0.0184 .

Después de llevar a cabo un análisis en diagramas de dispersión de la relación entre los diferentes parámetros de control con respecto a sus abscisas. Ahora se procede a realizar un análisis en coordenadas paralelas también con la finalidad de observar más a detalle el comportamiento de las soluciones.

4.4.3. Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PID

Para analizar con mas detalle el conjunto de Pareto para el concepto de diseño PID (Fig. 4.19). Ahora se lleva a cabo un análisis mediante el uso de coordenadas paralelas (Fig. 4.22). En esta figura se muestra la relación entre las diferentes ganancias (k_p , k_i , k_d) y para hacer un análisis con mayor detalle, dicho conjunto de Pareto se ha dividido en base a su estabilidad en tres principales grupos. El primer grupo está determinado por el intervalo ($-0.912 \leq abscisas \leq -0.55$) y corresponde al conjunto de soluciones con mayor estabilidad y han sido representados en color azul. El segundo grupo está determinado por el intervalo ($-0.54 \leq abscisas \leq -0.3$) y corresponde al grupo de abscisas con una estabilidad intermedia y están representadas por el color verde. Por último, el tercer grupo está determinado por el intervalo ($-0.29 \leq abscisas \leq -0.014$) y corresponde al grupo de abscisas con menor estabilidad y han sido representadas con el color rojo.

En la Figura (4.23 a,b,c) se puntualiza con mayor detalle la clasificación que se menciona en el párrafo anterior. Por ejemplo, en la Figura 4.23a, se muestra el conjunto de soluciones con las abscisas espectrales de mayor estabilidad en comparación con el conjunto de soluciones de las

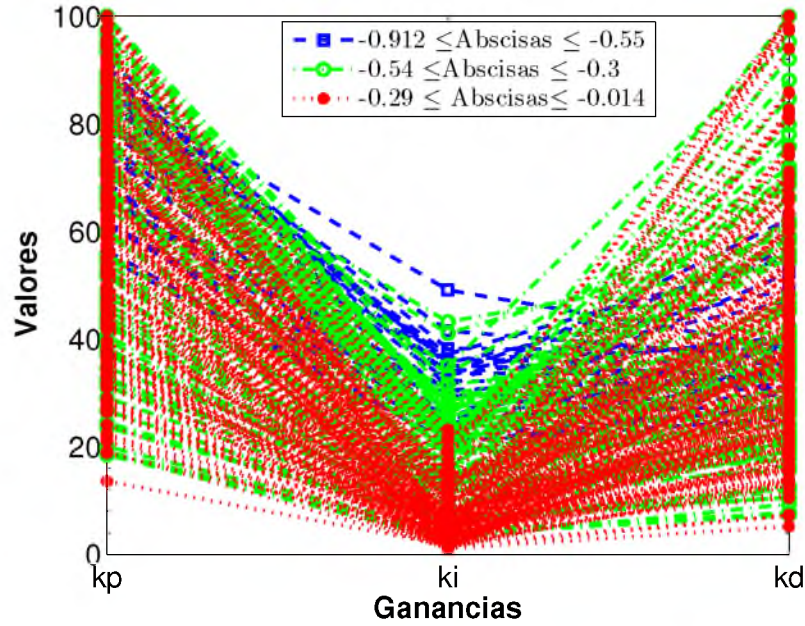


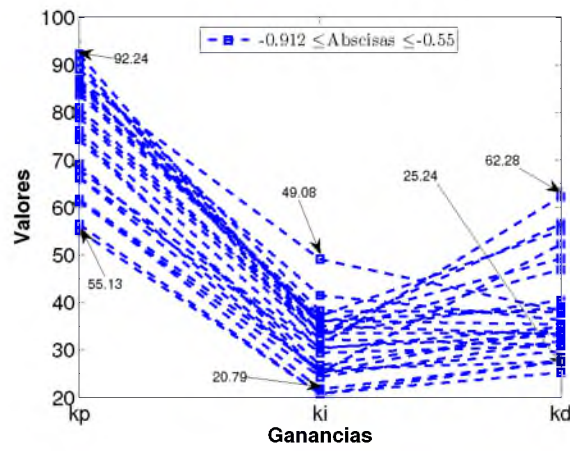
Figura 4.22: Coordenadas Paralelas, conjunto de Pareto, concepto de diseño PID.

Figuras 4.23b y 4.23c. Sus abscisas espectrales corresponden al intervalo $(-0.912 \leq abscisas \leq -0.55)$ y sus parámetros de control corresponden a $(55.13 \leq k_p \leq 92.242)$, $(20.79 \leq k_i \leq 49.08)$ y $(25.24 \leq k_d \leq 62.28)$.

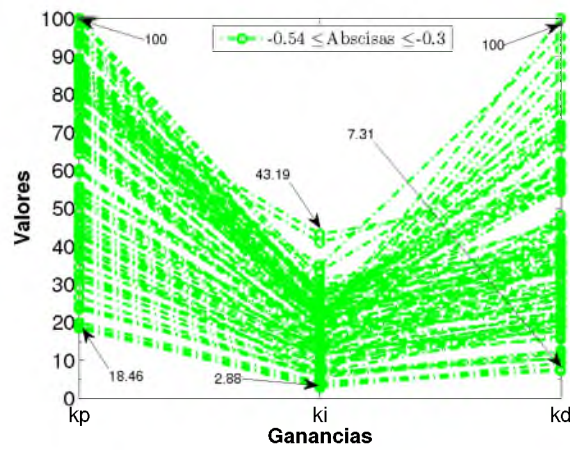
En la Figura 4.23b, se muestra el conjunto de soluciones con un rango de estabilidad intermedia $(-0.54 \leq abscisas \leq -0.3)$ en comparación con las Figuras 4.23a y 4.23c y sus parámetros de control se encuentran en el rango de $(18.46 \leq k_p \leq 100)$, $(2.88 \leq k_i \leq 43.19)$ y $(7.31 \leq k_d \leq 100)$.

Por último en la Figura 4.23c, se muestra el conjunto de soluciones con la menor estabilidad, en comparación el conjunto de soluciones de las Figuras 4.23a y 4.23b. Sus abscisas espectrales corresponden al intervalo $(-0.29 \leq abscisas \leq -0.014)$ y sus ganancias de control corresponden a $(13.59 \leq k_p \leq 100)$, $(1.04 \leq k_i \leq 23.15)$ y $(5.18 \leq k_d \leq 100)$.

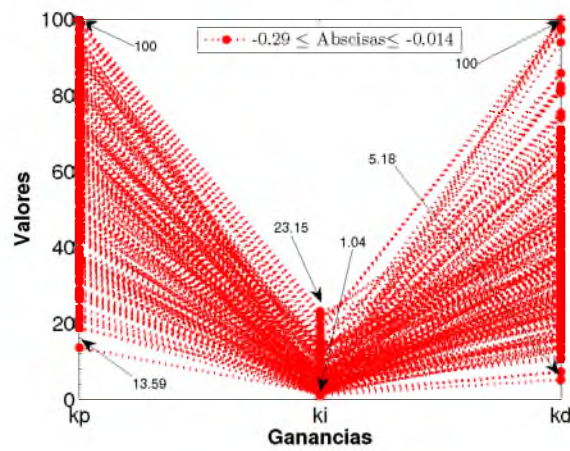
En general, se puede observar que para el parámetro de control k_p , las soluciones han sido catalogadas con mayor estabilidad 4.23a, presentan un intervalo estrecho $(55.13 \leq k_p \leq 92.24)$ y con poca dispersión de soluciones a lo ancho de éste, en comparación con los intervalos $(18.46 \leq k_p \leq 100)$ y $(13.59 \leq k_p \leq 100)$ de las soluciones con mediana 4.23b y mayor 4.23c estabilidad respectivamente.



(a) Soluciones que representan mayor estabilidad.



(b) Soluciones que representan estabilidad intermedia.



(c) Soluciones que representan poca estabilidad.

Figura 4.23: Análisis del conjunto de Pareto para el concepto de diseño PID. 97

Con respecto al parámetro k_i . Comparando las Figuras (4.23b y 4.23c) se tiene que el conjunto de combinaciones comprendidas en los intervalos aproximados de $(13.59 \leq k_p \leq 100)$, $(1.04 \leq k_i \leq 43.19)$ y $(5.18 \leq k_d \leq 100)$ muestran una diferencia notable, que mientras se incrementa k_i las soluciones son más estables. En cambio, al comparar las tres figuras (4.23a, 4.23b y 4.23c) para el conjunto de combinaciones en los intervalos de $(55 \leq k_p \leq 100)$, $(20.79 \leq k_i \leq 100)$ y $(25 \leq k_d \leq 100)$ la figura 4.23a muestra mayor estabilidad que las otras dos.

Ahora, con respecto al parámetro k_d se puede observar que las Figuras (4.23b y 4.23c) tiene aproximadamente la misma amplitud de intervalo $(5.18 \leq k_d \leq 100)$ y una dispersión de soluciones es similar. En cambio para las soluciones con mayor estabilidad (Fig. 4.23c) el intervalo $(25.24 \leq k_d \leq 62.28)$ es más estrecho, pero en este intervalo se encuentran las soluciones con mayor estabilidad.

En general, se puede concluir que al dividir el conjunto de Pareto en tres regiones, se puede apreciar con mayor detalle la influencia que tiene cada uno de los parámetros de control (k_p , k_i , k_d) al clasificarlos en base a su abscisa espectral que es el parámetro que determina su estabilidad.

4.4.4. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas para con concepto de diseño PID

El frente de Pareto (Fig.4.24) para el concepto de diseño PID en coordenadas paralelas permite analizar más a profundidad la forma en que se interrelacionan los índices ITSE y TVU, en el escenario regulatorio y escenario servo. Para realizar dicho análisis el frente de Pareto se ha dividido en tres principales grupos o regiones, tomando como base su abscisa espectral. El primer grupo (Fig. 4.25a) (color azul) representa al conjunto de soluciones más estables y corresponde a un intervalo de abscisas espectrales $(-0.912 \leq abscisas \leq -0.55)$. El segundo grupo (Fig. 4.25b)(color verde) corresponde a un conjunto de soluciones con una estabilidad intermedia de acuerdo a la clasificación establecida y corresponde a un conjunto de abscisas espectrales $(-0.54 \leq abscisas \leq -0.3)$ y el tercer grupo (Fig. 4.25c) (color rojo) corresponde al grupo de soluciones con abscisas espectrales de menor estabilidad $(-0.29 \leq abscisas \leq -0.014)$.

Cada uno de los grupos mencionados anteriormente se examinan con más destalle a continuación. Por ejemplo, en la Figura 4.25a, que corresponde al grupo de soluciones con mayor estabilidad. En este caso, el índice $ITSE_{regulatorio}$ se observa que la solución tomada de referencia (Jhunjunwala y Chidambaram, 2001) tiene el valor más alto normalizado (valor=1), en

comparación con las soluciones obtenidas por optimización cuyo valor más alto es de 0.011. Para el índice $ITSE_{servo}$ de igual manera las soluciones obtenidas por optimización siguen manteniendo sus valores menores ($0.067 \leq ITSE_{servo} \leq 0.291$) mientras que la solución de referencia sigue manteniendo su valor (valor=1.0). Ahora bien, el comportamiento cambia para $TVU_{regulatorio}$ y TVU_{servo} , ya que para éstos índices sus valores se invierten, ahora, el control de referencia es menor que ($TVU_{regulatorio} = 0.294$) y ($TVU_{servo} = 0.023$) a los obtenidos por optimización cuyos intervalos se encuentran en los intervalos ($0.325 \leq TVU_{regulatorio} \leq 0.926$) y ($0.36 \leq TVU_{servo} \leq 0.75$) respectivamente.

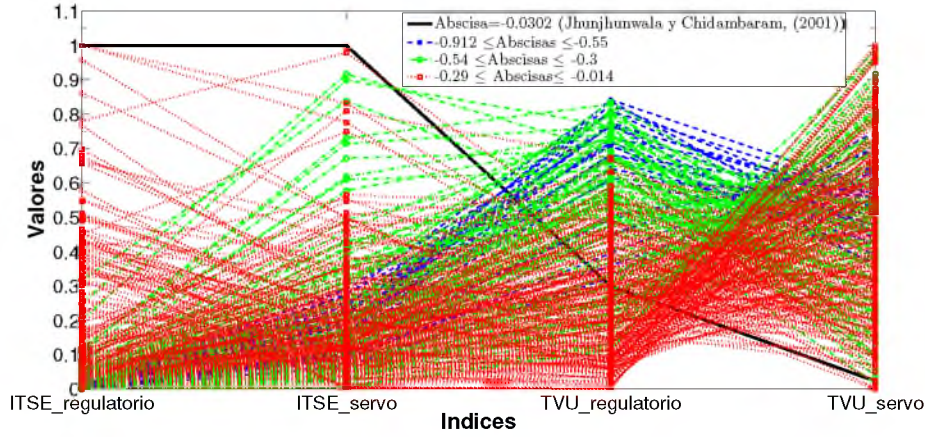


Figura 4.24: Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PID.

Con respecto al segundo grupo de soluciones correspondiente al conjunto de abscisas espectrales con una estabilidad intermedia (4.25b). Para los índices $ITSE_{regulatorio}$ e $ITSE_{servo}$ se observa en el control tomado de referencia, se mantiene el valor normalizado más alto (valor=1), en tanto que para las soluciones obtenidas por optimización se tienen valores de menor magnitud, por ejemplo, para el caso $ITSE_{regulatorio}$ se encuentran en el intervalo ($0.0 \leq ITSE_{regulatorio} \leq 0.0318$) y para el caso $ITSE_{servo}$ se encuentran en el intervalo ($0.0 \leq ITSE_{servo} \leq 0.917$). Para índice $TVU_{regulatorio}$ el control de referencia tiene un valor de 0.29 el cual se encuentra dentro del intervalo de las soluciones obtenidas por optimización ($0.113 \leq TVU_{regulatorio} \leq 0.29$) y finalmente para el índice TVU_{servo} , el control de referencia alcanza un valor de 0.023 (cercano a límite inferior de las soluciones obtenidas por optimización) en tanto que para las soluciones obtenidas por optimización se encuentran en un intervalo de ($0.017 \leq TVU_{servo} \leq 0.989$).

Entonces, para este caso con abscisas de estabilidad intermedia, se puede observar que conforme disminuye el grado de estabilidad se incrementa la amplitud del intervalo de $TVU_{regulatorio}$ y TVU_{servo} para las soluciones obtenidas por optimización. Así como también se aprecia que existen soluciones que coinciden con la de solución de referencia.

Ahora bien, con respecto al tercer conjunto de abscisas con poca estabilidad (Fig. 4.25). Para el índice $ITSE_{regulatorio}$ el control de referencia alcanza el valor máximo normalizado (valor=1) mientras que para las soluciones obtenidas por optimización existen dos soluciones que alcanza también el valor máximo normalizado y las demás soluciones tienen valores menores ($0.0 \leq ITSE_{regulatorio} \leq 1.0$) a los dos ya mencionados. Para el índice $ITSE_{servo}$ el valor de referencia sigue manteniendo su valor (valor=1) pero las soluciones obtenidas por optimización, existe una que tiene valores cercano (0.979), en tanto que las demás tiene valores encuentran en el intervalo ($0.0 \leq ITSE_{servo} \leq 0.979$). Ahora bien para el índice de control $TVU_{regulatorio}$ el control de referencia alcanza un valor de 0.2268 y se encuentra aproximadamente a mitad del intervalo ($0.0 \leq TVU_{regulatorio} \leq 0.673$) de las soluciones obtenidas por optimización. Por último, para el índice TVU_{servo} el valor del control tomado de referencia es de 0.16 y también se encuentra dentro del intervalo ($0.0 \leq TVU_{servo} \leq 1.0$) de las soluciones obtenidas por optimización por lo que se puede observar se tiene soluciones que superan al control tomado de la referencia bibliográfica.

Con respecto al conjunto de soluciones con poca estabilidad mencionado en el párrafo anterior, en general se puede observar que conforme el valor de su abscisa se vuelve más positiva, incrementa en magnitud el valor de los índices. Algo importante que se puede notar en este grupo de soluciones es que algunos valores de abscisas espectrales son semejantes al valor de la abscisa de referencia, es por esta razón que algunas soluciones tienen un comportamiento similar en los cuatro índices.

De acuerdo a la clasificación de los tres grupos (Fig. 4.25a,b,c) en base a su abscisa espectral, se puede concluir que para el índice $ITSE_{regulatorio}$, entre más negativa es la abscisa espectral su valor de este índice es más cercano a cero. Para $ITSE_{servo}$ se puede observar que este índice depende de la estabilidad ya que su valor de las soluciones empieza a crecer conforme el valor de la abscisa se vuelve más positiva (Fig. 4.25c). Ahora bien, para el índice $TVU_{regulatorio}$ el valor del control de referencia desciende a 0.29, el cual se encuentra a la mitad del intervalo de soluciones obtenidas por optimización. Para índice TVU_{servo} , la distribución de las soluciones obtenidas por optimización están dispersas entre el máximo (1.0) y mínimo (0.0) de los valores normalizados (Figs. 4.25b,c.). Para el control de referencia se observa que este índice alcanza su valor mínimo (0.02) muy cercano a límite

inferior de las soluciones con estabilidad intermedia y poca estabilidad.

Después de haber analizado la interrelación mediante coordenadas paralelas entre los diferentes índices (Fig. 4.25) a continuación se lleva a cabo un proceso de evaluación numérica de las soluciones obtenidas por optimización así como también del control tomado de referencia.

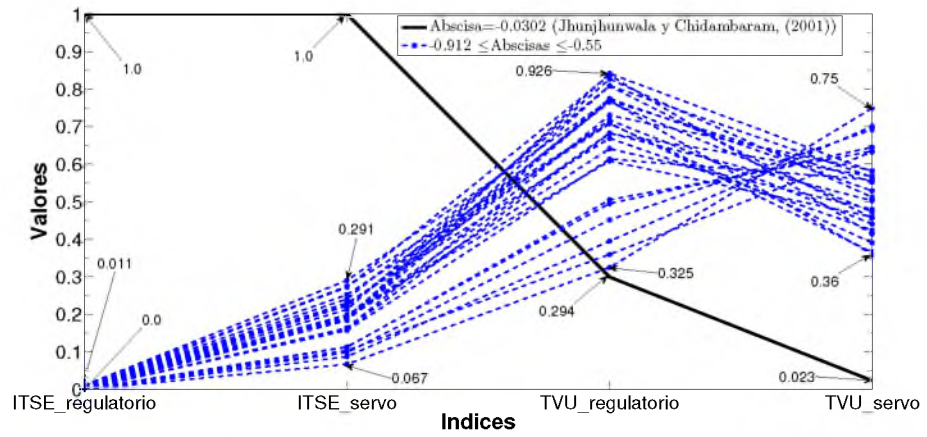
4.4.5. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PID

Para mayor claridad en la evaluación, el conjunto de Pareto se ha clasificado en tres grupos en base a su abscisa espectral (de manera similar que la sección de análisis en coordenadas paralelas), las soluciones identificadas con el color azul, es el grupo con una abscisa espectral más negativa y se encuentra en el intervalo de $(-0.912 \leq abscisas \leq -0.55)$. El segundo grupo identificado con el color verde, es el grupo de abscisas con una estabilidad intermedia y se encuentra en el intervalo de $(-0.54 \leq abscisas \leq -0.3)$ y el tercer grupo identificado con el color rojo, corresponde a las soluciones con una abscisa espectral más cercanas a cero y se encuentran en el intervalo de $(-0.29 \leq abscisas \leq -0.014)$. Esta misma clasificación es aplicada tanto a la señal de salida como a la señal de control y para ambos escenarios regulatorio y servo.

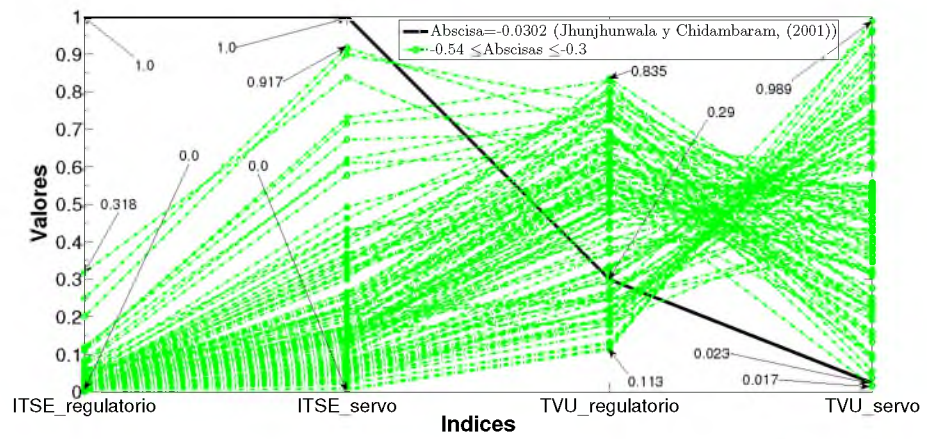
Entonces, para la salida del sistema en escenario regulatorio (Fig. 4.26a) se observa que la señal de referencia propuesta por Jhunjunwala y Chidambaram (2001) tiene un sobresalto y tiempo de asentamiento muy grande aproximadamente en un rango de 180 y 200 segundos en comparación con las soluciones obtenidas por optimización que tiene un sobresalto y un tiempo de asentamiento menor aproximadamente entre 50 y 70 segundos.

En la misma Figura 4.26a, se hace un acercamiento para observar más a detalle el sobresalto y tiempo de asentamiento de las soluciones obtenidas por optimización. Se puede apreciar que las soluciones con menor sobre salto son las de color azul (más estables) y visualmente se observa que tienen un menor tiempo de estabilización. En cambio las soluciones en color verde (estabilidad intermedia) tienen un mayor sobresalto que el grupo de color azul aunque se puede apreciar también que su tiempo de asentamiento de algunas de ellas es mayor. Ahora, para el grupo de soluciones en color rojo (poca estabilidad) se puede apreciar que existen algunas soluciones que pudieran ser aceptables, ya que tienen un sobresalto y un tiempo de asentamiento semejante al grupo de soluciones en color verde y color azul.

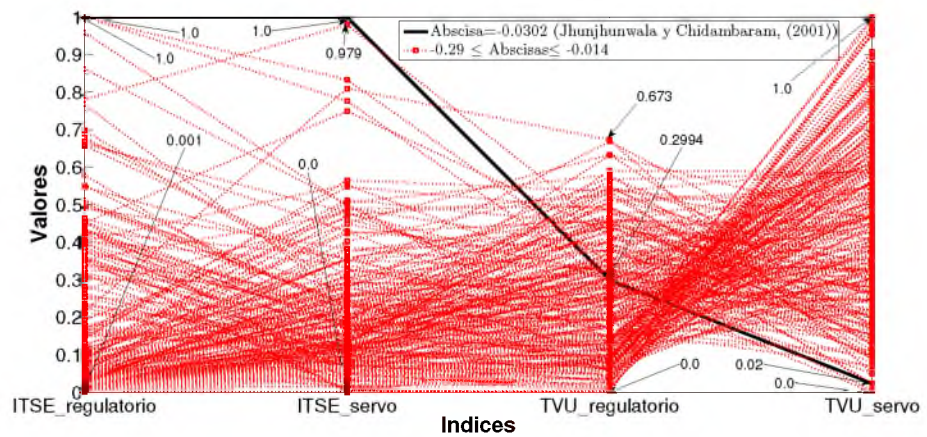
Para la señal de control (4.26b) del escenario regulatorio, se observa un



(a) Soluciones que representan mayor estabilidad



(b) Soluciones que representan estabilidad intermedia



(c) Soluciones que representan poca estabilidad

Figura 4.25: Análisis del frente de Pareto para el concepto de diseño PID.

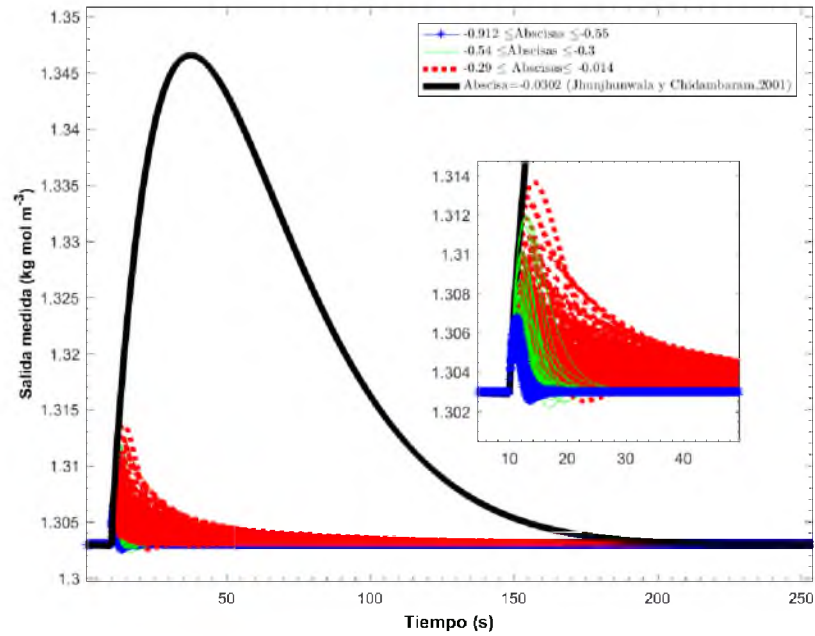
control muy suave en la solución de referencia con un bajo salto no muy pronunciado pero con un tiempo de asentamiento muy grande, aproximadamente entre 150 y 180 segundos. En tanto que las soluciones obtenidas por optimización aunque muestran un comportamiento más agresivo (bajo salto muy pronunciado) logran controlar el sistema en un tiempo menor, aproximadamente 80 y 120 segundos.

Para observar con mayor detalle se hace un acercamiento (4.26b) de la zona donde todas las soluciones comparten una región en común y en la cual se puede apreciar que las soluciones de la región azul son las que tienen un mayor bajo salto, pero también son las que tardan más en estabilizar. Posterior a ello, se observa que el conjunto de soluciones de color verde son las que tienen un bajo salto intermedio entre las rojas y las azules. Por último, se observa que el control de las soluciones con menor estabilidad (color rojo) tienen un bajo menor bajo salto menor, es decir, el esfuerzo de control es menor en estas soluciones.

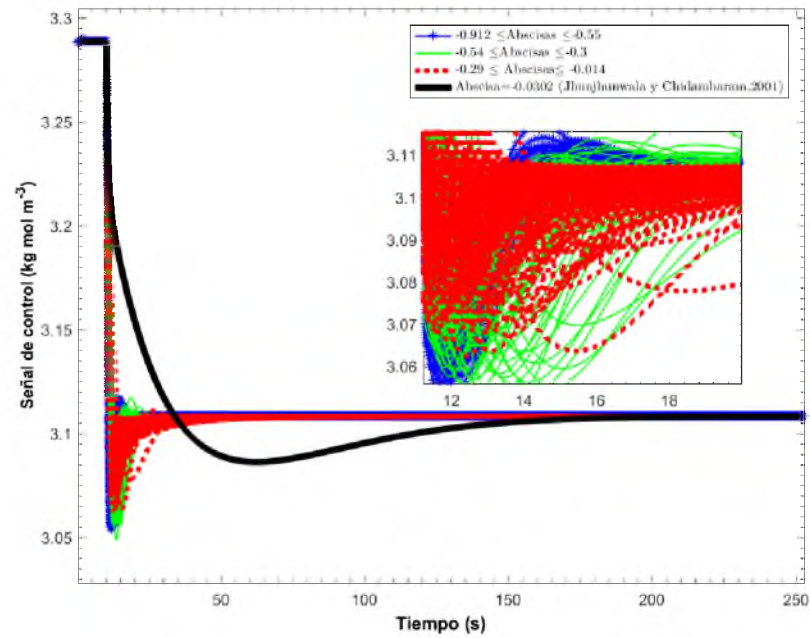
Para el caso de la señal de salida en escenario servo (Fig. 4.27a), el control tomado de referencia (línea sólida en color negro) se observa que tiene un sobre salto pequeño pero un tiempo de asentamiento muy grande aproximadamente en un intervalo de 150 y 200 segundos, en comparación con las soluciones obtenidas por optimización. Se observa que algunas soluciones en color rojo (menos estables) tienen un sobresalto similar, debido a que sus abscisas espectrales están más o menos en la misma magnitud como se puede observar en la leyenda de la misma figura. Aunque su tiempo de asentamiento de las soluciones obtenidas por optimización es más pequeño aproximadamente entre 40 y 60 segundos. Para el conjunto de soluciones en color azul y verde se observa que tienen un mayor sobresalto e incrementa conforme incrementa su estabilidad.

Ahora, para la señal de control del escenario servo (Fig. 4.27b) puede observarse que el comportamiento del control de referencia es un poco agresivo pero su tiempo de asentamiento es menor en comparación con las soluciones obtenidas por optimización que tienen un sobre salto más grande, así como también sus tiempos de asentamiento son mayores. También se puede observar que las soluciones con menor estabilidad cuyas abscisas se encuentran en el rango $(-0.29 \leq \text{abscisas} \leq -0.14)$ son las que tienen un menor sobresalto y un menor tiempo de asentamiento.

Del análisis anterior, se puede determinar que para el concepto de diseño PID, en el escenario regulatorio y servo el grado de estabilidad indica que no necesariamente las soluciones con mayor grado de estabilidad serán las mejores, más bien, para este caso en particular se puede observar que entre menor sea su estabilidad se logra estabilizar mejor al sistema.



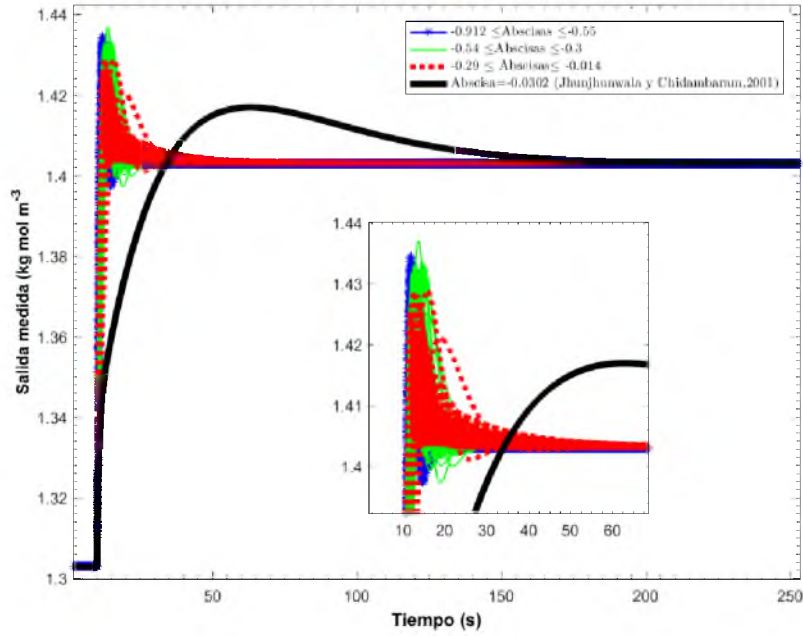
(a) Salida del sistema, en un concepto de diseño PID, escenario regulatorio.



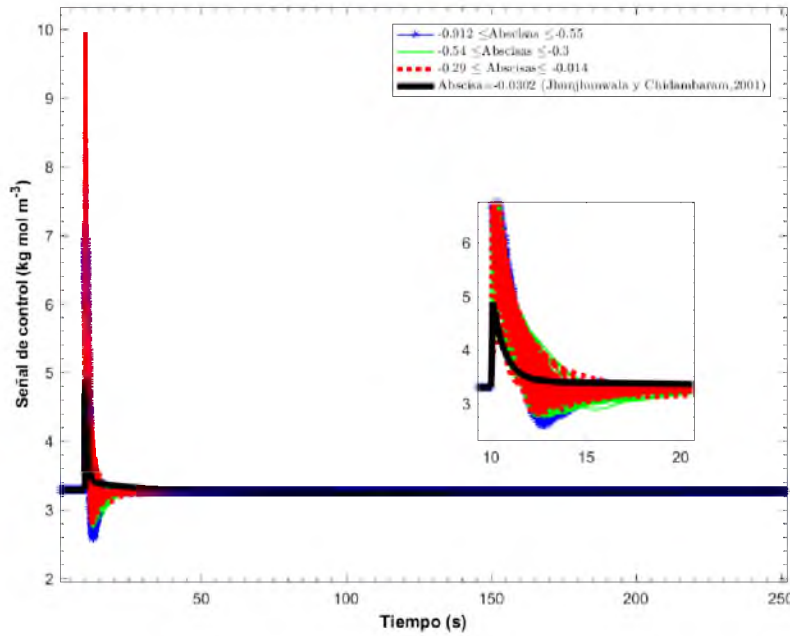
(b) Señal de control, en un concepto de diseño PID en el escenario regulatorio.

Figura 4.26: Señal de salida del sistema y de control para un concepto de diseño PID.

4.4. Concepto de diseño PID



(a) Salida del sistema, en un concepto de diseño PID en el escenario servo.



(b) Señal de control, en un concepto de diseño PID en el escenario servo.

Figura 4.27: Señal de salida y de control para un concepto de diseño PID.

4.5. Concepto de diseño PIDn

4.5.1. Resultados de la región de estabilidad para el concepto de diseño PIDn

Para establecer la región de estabilidad para el concepto de diseño PIDn (Ec. 1.10) se toma como referencia el control propuesto por [Rajinikanth y Latha \(2012b\)](#) el cual tiene parámetros de control: la ganancia proporcional $k_p = 1.4715$, ganancia integral $k_i = 0.0147$, ganancia derivativa $k_d = 6.392$, y filtro del error $n = 10$. Entonces, tomando como base las ganancias anteriores se amplía el espacio de búsqueda para cada una de las ganancias como se muestra en la Tabla 4.9 con la finalidad de asegurar y encontrar un conjunto de soluciones estables de manera que éstas garanticen estabilidad del sistema de estudio. El proceso de encontrar la zona de soluciones estables se lleva a cabo mediante el Algoritmo 1 que se encarga de buscar todas las soluciones estables posibles dentro de un intervalo establecido (espacio inicial de búsqueda) a partir los eigenvalores de la matriz característica y como resultado se tendrá una zona de estabilidad que estará formada por un conjunto de ganancias k_p , k_i , k_d , n que garantizan soluciones estables (Fig.4.28).

Algoritmo de estabilidad 1									
Concepto de diseño	Espacio inicial de búsqueda β				Zona de estabilidad encontrada, δ				Zona de Abscisas estables
	k_p	k_i	k_d	n	k_p	k_i	k_d	n	min max
PIDn	[-100,100]	[-20,40]	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[-20,40]	[-100,100]	[-100,100]	-0.1372 -1.46E-19

Tabla 4.9: Espacio inicial de búsqueda, zona de estabilidad, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales, obtenidos mediante el Algoritmo 1 para el concepto de diseño PIDn.

4.5.2. Resultados de optimización para el concepto de diseño PIDn utilizando el algoritmo de optimización sp-MODE.

Después de obtener la zona de estabilidad para el concepto de diseño PIDn. Estos datos se toman como referencia y se da inicio al proceso de optimización utilizando un algoritmo evolutivo multiobjetivo ([Reynoso-Meza, 2010](#)), el cual toma como datos de entrada (población inicial) el valor de los parámetros de control de la zona de estabilidad (Tabla: 4.9). Durante este proceso de optimización el algoritmo buscará las mejores prestaciones entre los diferentes objetivos (Ec.4.1) que se desean optimizar.

Al finalizar el proceso de optimización se obtiene un conjunto de soluciones óptimas, llamado conjunto de Pareto y que se encuentra formado por los parámetros de control k_p , k_i , k_d , n . Así, como también se muestra la abscisa

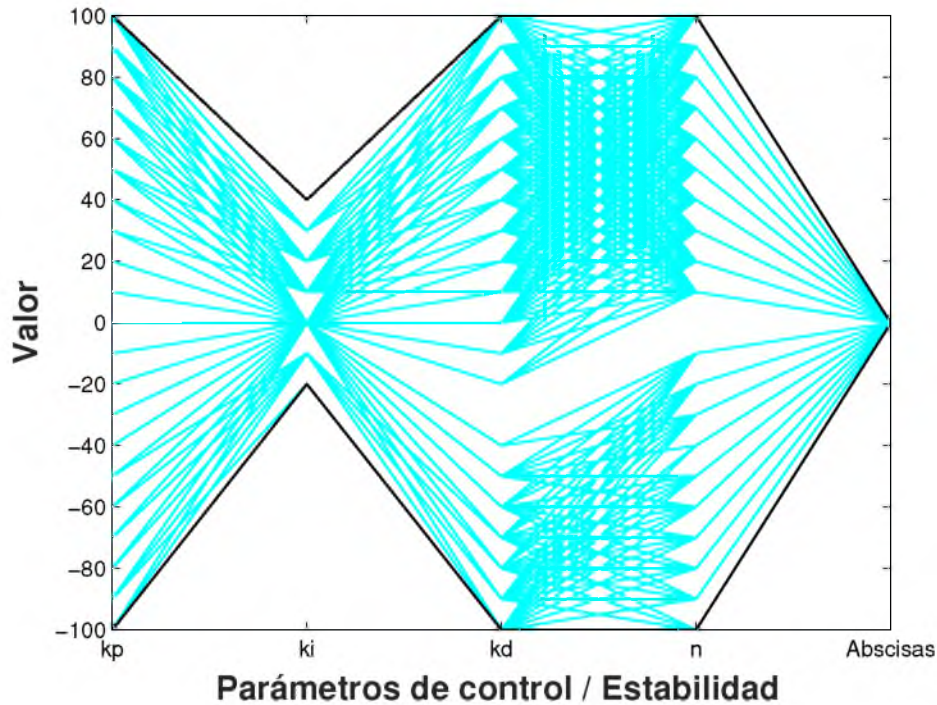


Figura 4.28: Zona de estabilidad para el concepto de diseño PIDn.

espectral mínima y máxima del conjunto de Pareto encontrado (Tabla 4.10).

Algoritmo de optimización sp-MODE								
Concepto de diseño	Zona de estabilidad β			Conjunto de Pareto σ			Intervalo de abscisas del	
	k_p	k_i	w_p	k_p	k_i	w_p	min	max
PIDn	[-100,100]	[-100,100]	[-100,100]	[8.03,100]	[0.533,57.11]	[2.22,100]	-0.8907	-0.0370

Tabla 4.10: Zona de estabilidad, conjunto de Pareto, valores mínimos y máximos de abscisas espectrales, obtenidos por optimización para el concepto de diseño PIDn.

A continuación se realiza un análisis más detallado del conjunto de Pareto utilizando coordenadas paralelas. Se analiza la relación entre los diferentes parámetros de control de acuerdo al grado de estabilidad.

4.5.3. Análisis del conjunto de Pareto mediante coordenadas Paralelas para el concepto de diseño PIDn

Para analizar con mas detalle el conjunto de Pareto para el concepto de diseño PIDn se lleva a cabo un análisis mediante el uso de coordenadas

paralelas (Fig. 4.29). En esta figura se muestran las relaciones entre los diferentes parámetros de control k_p , k_i , k_d y n . Para llevar a cabo un análisis más detallado de dicho conjunto de Pareto, se ha dividido en base a la estabilidad de cada solución en tres principales grupos (zonas). El primer grupo (color azul) está determinado por el intervalo $(-0.19 \leq \text{abscisas} \leq -0.17)$ cuyas abscisas espectrales son las más negativas y corresponde a las soluciones con mayor estabilidad. El segundo grupo (color verde) está determinado por el intervalo $(-0.16 \leq \text{abscisas} \leq -0.15)$ y corresponde a las soluciones con estabilidad intermedia. Por último el tercer grupo (color rojo) está determinado por el intervalo $(-0.14 \leq \text{abscisas} \leq -0.13)$ y corresponde a soluciones con poca estabilidad, es decir, sus abscisas espectrales son las más positivas y algunas de ellas son cercanas a cero.

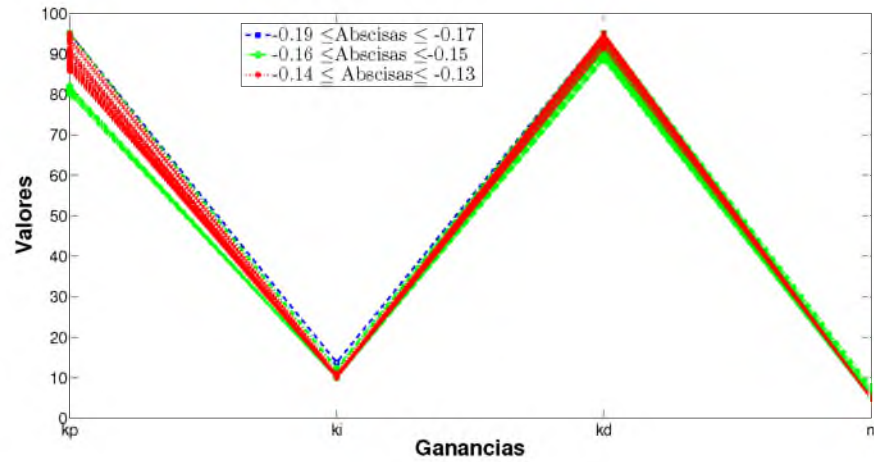


Figura 4.29: Conjunto de Pareto para el concepto de diseño PIDn.

En las Figuras (4.30, 4.31 y 4.32) se describe con mayor detalle la clasificación que se describe en el párrafo anterior.

En la Figura 4.30 se muestra la solución con mayor estabilidad con comparación con el conjunto de soluciones de las Figuras 4.31 y 4.32. Sus abscisas espectrales corresponden al intervalo $(-0.19 \leq \text{abscisas} \leq -0.17)$ y parámetros (ganancias) de control corresponden a $k_p = 95$, $k_i = 13.7$, $k_d = 95$ y $n = 5$.

En la Figura (4.31) se muestran las soluciones con estabilidad intermedia en comparación con las Figuras (4.30 y 4.32) el intervalo de sus abscisas espectrales se encuentran en el intervalo $(-0.16 \leq \text{abscisas} \leq -0.15)$ y sus respectivos ganancias se encuentran en los intervalos $(80 \leq k_p \leq 95)$, $(10 \leq k_i \leq 12.43)$, $(88.3 \leq k_d \leq 95)$, $(5.2 \leq k_p \leq 7.85)$.

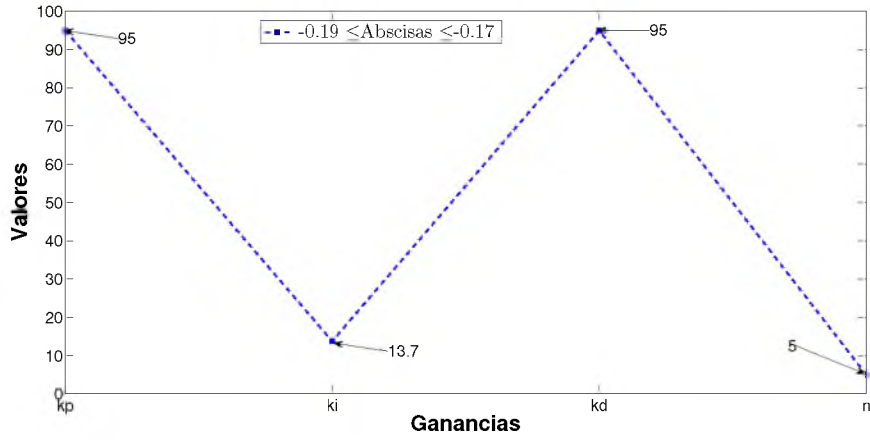


Figura 4.30: Soluciones que representan mayor estabilidad para el concepto de diseño PIDn.

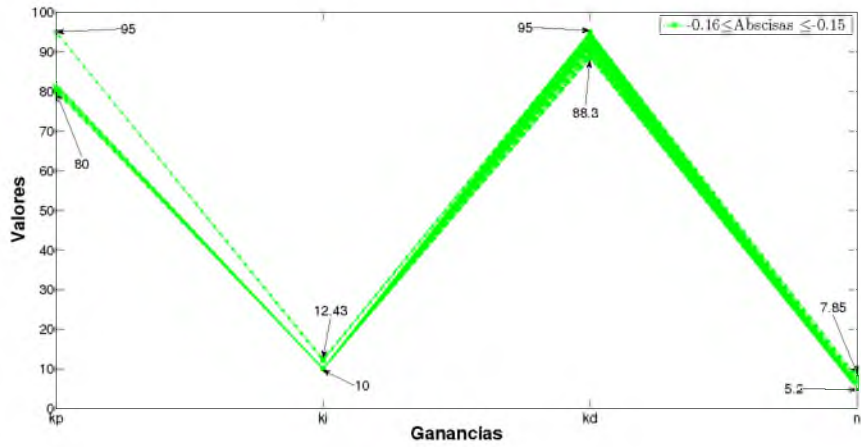


Figura 4.31: Soluciones que representan estabilidad intermedia para el concepto de diseño PIDn.

En la Figura (4.32) se muestran las soluciones con la menor estabilidad en comparación con las Figuras (4.30 y 4.31), el intervalo de sus abscisas espectrales se encuentran en el rango de $(-0.14 \leq abscisas \leq -0.13)$ y sus respectivas ganancias tienen los siguientes intervalos $(86.96 \leq k_p \leq 95)$, $(10 \leq k_p \leq 11.14)$, $(91.24 \leq k_d \leq 95)$, $(5 \leq n \leq 5.18)$.

Se puede observar, para las tres regiones descritas anteriormente que tie-

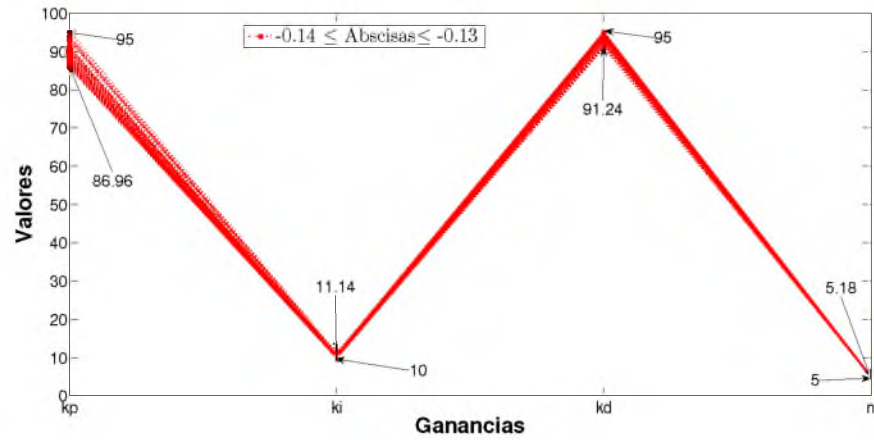


Figura 4.32: Soluciones que representan poca estabilidad para el concepto de diseño PIDn.

nen un comportamiento similar, por ejemplo para región más estable (Fig. 4.30), la estabilidad de la ganancia k_p se obtiene cuando su ésta alcanza su valor máximo (≈ 95). Para la región con mediana estabilidad (color verde) (Fig. 4.31) k_p es estable para valores altos ($80 \leq k_p \leq 95$), pero se puede observar que la estabilidad va disminuyendo conforme disminuye la magnitud. Ahora bien para la región con poca estabilidad (color rojo) (4.32) también se puede observar que los valores de k_p están en un rango similar ($86.96 \leq k_p \leq 95$).

Ahora analizando las tres regiones para la ganancia k_i , se puede observar que para la región estable (color azul) (Fig. 4.30) su valor corresponde a $k_p = 13.7$. Para la región verde(estabilidad intermedia) (Fig. 4.31) la ganancia k_i se encuentra en el rango ($10 \leq k_i \leq 12.43$). En tanto que para la región roja (menos estable) (Fig. 4.32) el rango de la ganancia de la ganancia k_i se encuentra en el intervalo ($10 \leq k_i \leq 11.14$). Para esta ganancia se puede observar que la estabilidad está determinada en cierta manera por su magnitud, entre mayor es su magnitud, mayor es su estabilidad (Fig.4.29), aunque también se observa que la diferencia es muy poca.

Para la ganancia k_d , la mayor estabilidad se obtiene cuando ésta alcanza su valor máximo $k_d = 95$ como se observa en la región azul (Fig. 4.30). Para la región verde (Fig. 4.31) la estabilidad de k_d está determinada por el intervalo ($88.3 \leq k_d \leq 95$). En tanto que para la región roja (Fig. 4.32) que es la menos estable la estabilidad de k_d se encuentra en el intervalo ($91.24 \leq k_d \leq 95$). Para esta ganancia se puede observar que en la región con mediana estabilidad(verde) se encuentra el intervalo más amplio de so-

luciones (4.29) pero además también se observa que comparten un intervalo con magnitudes similares.

Para la ganancia n , la mayor estabilidad se alcanza cuando dicha ganancia tiene el valor $n = 5$ y corresponde a la región más estable (Fig. 4.30). Es con este valor y en esta región es cuando se alcanza la abscisa espectral más negativa (más estable) del concepto de diseño PIDn. En cambio para la región verde (Fig. 4.31) el intervalo de soluciones para n es más amplio está determinado por $(5.2 \leq n \leq 7.85)$ y la estabilidad de estas soluciones es menor. Ahora bien, para la región en color rojo (Fig. 4.32) que corresponde a las soluciones con abscisas espectrales menos estables, estas se encuentran en el intervalo $(5 \leq n \leq 5.18)$ y es más estrecho que conjunto de soluciones con estabilidad intermedia.

En conclusión, basándose en la Figura (4.29) en la cual muestra el conjunto de Pareto de manera general. Se puede observar que para la ganancia k_p la estabilidad se logra cuando $k_p = 95$, que es el valor máximo que alcanza dicha ganancia. Posteriormente se encuentran definidas las soluciones con menor estabilidad (color rojo) y por último se encuentran definidas las soluciones con estabilidad intermedia (color verde), siendo este grupo las que toman los valores menores de k_p . Este intervalo se encuentra definido para $(80 \leq k_p \leq 95)$. Para la ganancia k_i el intervalo es más estrecho con respecto al intervalo de k_p y la estabilidad se encuentra definida de la siguiente manera. El máximo valor de k_i corresponde a la solución con mayor estabilidad seguida por la estabilidad de la región establecida en color verde y finalmente se encuentra las soluciones con la menor estabilidad (color rojo). Este intervalo se encuentra definido por los valores $(10 \leq k_i \leq 13.7)$. Ahora, para la ganancia k_d se observa que no es muy clara o muy marcada la separación entre las diferentes regiones. Pero aún así, se logra observar la diferencia entre la región menos estable y la región con estabilidad intermedia, este intervalo se encuentra definido entre los valores $(88.3 \leq k_i \leq 95)$. Finalmente para ganancia n se observa que el intervalo es muy estrecho $(5 \leq n \leq 7.85)$ no existe mucha variación entre las diferentes regiones establecidas, pero aún así, se observa que la región establecida como menos estable es la que toma los valores menores de k_p .

Por lo anterior se podría considerar que el la región verde (estabilidad intermedia), es la que logra al parecer tener un mejor equilibrio entre los diferentes parámetros de control.

4.5.4. Evaluación o análisis del frente de Pareto en coordenadas Paralelas para con concepto de diseño PIDn

El frente de Pareto en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PIDn (Fig. 4.33) profundizar y averiguar el comportamiento y relación entre los índices ITSE y TVU para el escenario regulatorio y escenario servo. Para realizar un análisis más a profundidad el frente de Pareto se ha dividido en tres principales grupos (regiones) tomando como base la abscisa espectral de cada solución. El primer grupo (Fig. 4.34 a) (color azul), representa al conjunto de soluciones más estables y corresponde a un intervalo de abscisas espectrales ($-0.19 \leq abscisas \leq -0.17$). El segundo grupo (Fig. 4.34 b) (color verde) representa al conjunto de soluciones con estabilidad intermedia de acuerdo a la clasificación establecida y corresponde a un conjunto de abscisas espectrales ($-0.16 \leq abscisas \leq -0.15$) y el tercer grupo (Fig. 4.34 c) (color rojo) corresponde al conjunto de abscisas espectrales con menor estabilidad ($-0.14 \leq abscisas \leq -0.13$) con valores más cercanos a cero.

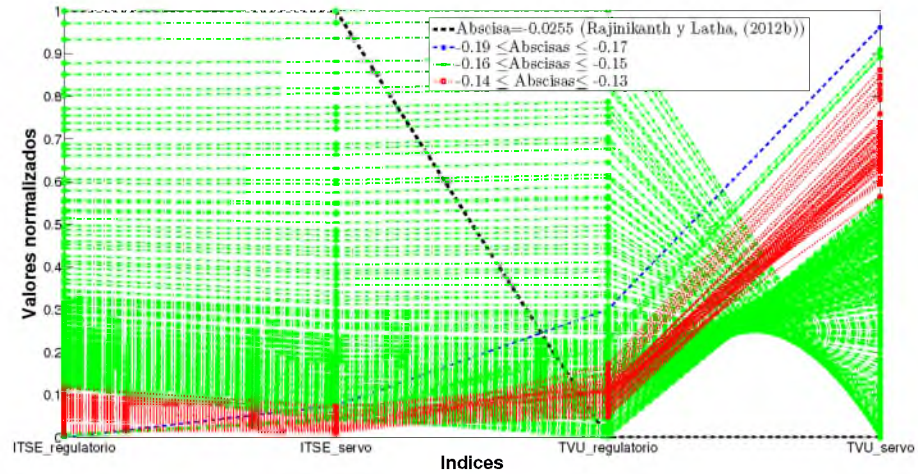
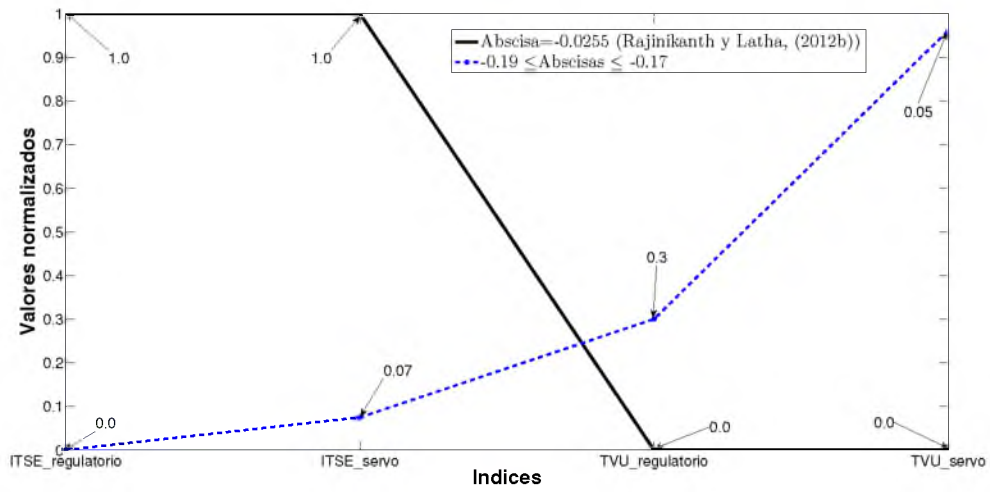


Figura 4.33: Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PIDn.

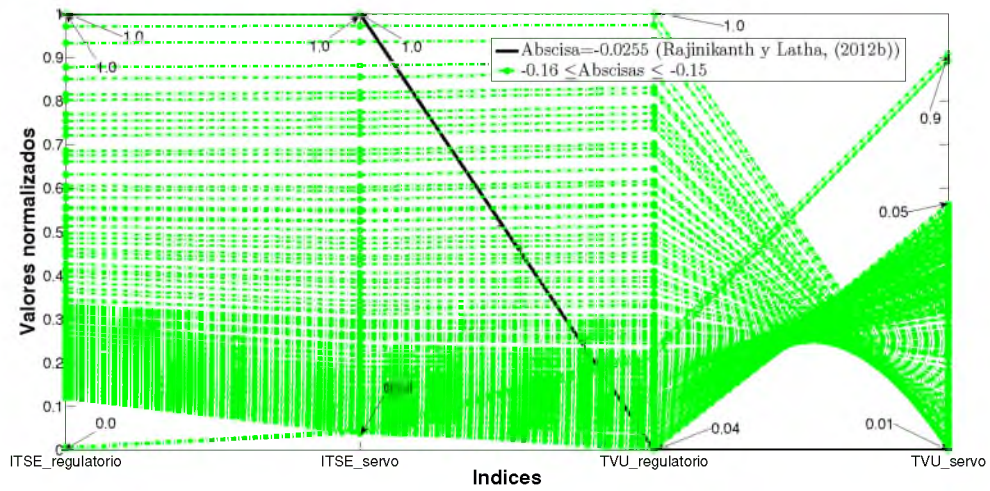
Cada uno de los grupos establecidos anteriormente se describen y examinan con más detalle a continuación.

En la Figura 4.34a, que corresponde al grupo de soluciones con mayor estabilidad se observa que para el índice $ITSE_{regulatorio}$ la solución tomada de referencia (Rajinikanth y Latha, 2012b) tiene el valor máximo normalizado (valor= 1.0), en comparación con las soluciones obtenidas por optimización cuyo valor para este índice es cero (valor= 0.0). Entonces, se puede observar

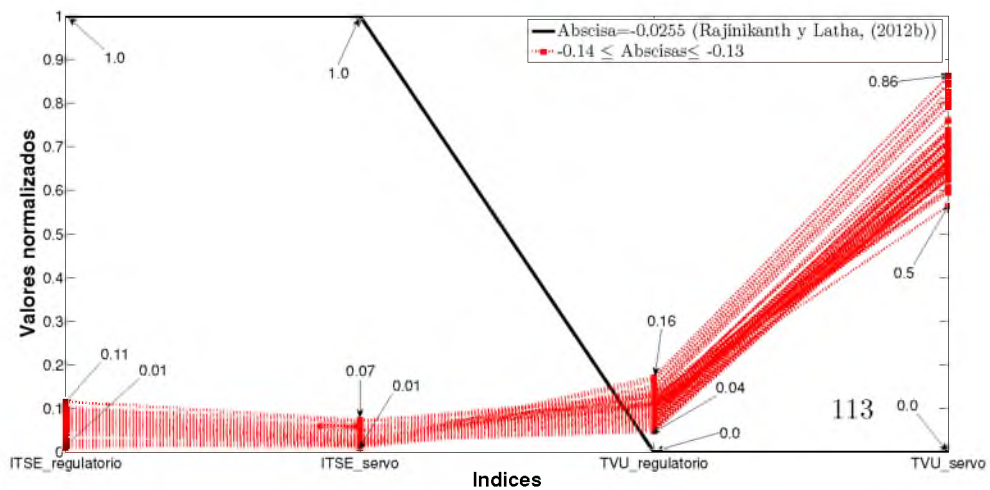
4.5. Concepto de diseño PIDn



(a) Soluciones que representan mayor estabilidad



(b) Soluciones que representan estabilidad intermedia



(c) Soluciones que representan poca estabilidad

Figura 4.34: Análisis del frente de Pareto para el concepto de diseño PIDn.

que $ITSE_{regulatorio}$ depende mucho de la estabilidad de la solución.

Para el índice $ITSE_{servo}$ la solución de referencia sigue manteniendo su valor (valor= 1.0) en tanto que para las soluciones obtenidas por optimización su valor sigue siendo menor, aunque tiene un incremento en su magnitud (valor= 0.07), así que también se puede decir que éste índice depende en cierto grado de la estabilidad de la solución.

Para el índice de control $TVU_{regulatorio}$ el valor de la solución de referencia (Rajinikanth y Latha, 2012b) tiene un cambio drástico en su magnitud de uno (1.0) a cero (0.0), en tanto que la solución obtenida por optimización para éste índice tiene una magnitud de 0.3. Por lo que se puede decir que no depende de la estabilidad de la solución ya que el valor de su abscisa (-0.0255) es muy cercano a cero y aún así muestra un valor muy pequeño este índice. En cambio la estabilidad de la solución azul (obtenida por optimización) el valor de su abscisa indica que es más estable, más sin embargo la magnitud de este índice es mayor.

Para el índice TVU_{servo} el valor de la solución de referencia (Rajinikanth y Latha, 2012b) tiene un valor cero (0.0). En contra parte, la solución obtenida por optimización para éste índice tiene un valor de 0.9. Entonces, se puede concluir que para este índice en el escenario servo no depende en absoluto de la estabilidad de la solución que se implemente.

En la Figura (Fig. 4.34b) que corresponde al conjunto de soluciones con mediana estabilidad (color verde) se puede observar lo siguiente. Para el control propuesto por Rajinikanth y Latha (2012b), éste índice alcanza el valor máximo normalizado (1.0), mientras que para las soluciones obtenidas por optimización el valor de este índice está disperso entre el valor mínimo y máximo ($0.0 \leq ITSE_{regulatorio} \leq 1.0$), como se puede observar en la figura. Ahora bien, para índice $ITSE_{servo}$, de igual manera tiene un comportamiento similar tanto para el control propuesto por Rajinikanth y Latha (2012b) ($ITSE_{servo} = 1.0$) como para las soluciones obtenidas por optimización, los valores se extienden a lo amplio del intervalo ($0.04 \leq ITSE_{servo} \leq 1.0$). Ahora para $TVU_{regulatorio}$ el valor de este índice para el control tomado de referencia cambia 0.04, en tanto que para las soluciones propuestas, el valor para éste índice se encuentra disperso a lo ancho del intervalo ($0.0 \leq TVU_{regulatorio} \leq 1.0$) de los valores normalizados. Por último, para TVU_{servo} el valor de este índice para el control de referencia (Rajinikanth y Latha, 2012b) sigue conservando su valor de cero (0.0), en cambio para las soluciones propuestas valor para éste índice se reduce ($0.01 \leq TVU_{servo} \leq 0.9$).

Para esta región establecida como soluciones con mediana estabilidad (Fig. 4.34 b) se puede concluir que para los índices $ITSE_{regulatorio}$, $ITSE_{servo}$ y $TVU_{regulatorio}$ existen soluciones obtenidas por optimización que tienen

valor semejante al que tomó de referencia aunque se observa también que existen otras que tiene un valor mayor o menor que ésta. Por lo que en el momento de tomar alguna solución para implementar se tiene rango de decisión. Para el TVU_{servo} también se tiene valores semejantes, pero el intervalo de soluciones obtenidas por optimización se reduce.

En la Figura (Fig. 4.34 c) se muestra el grupo de soluciones con menor estabilidad y se puede observar que el valor del índice $ITSE_{regulatorio}$ para el control propuesto por [Rajinikanth y Latha \(2012b\)](#) tiene el valor máximo(1.0), en tanto que las soluciones obtenidas por optimización se encuentran en el intervalo de ($0.01 \leq ITSE_{regulatorio} \leq 0.11$). Para $ITSE_{servo}$ el valor de este índice se sigue manteniendo en 1.0 mientras que para las soluciones propuestas se centran en el intervalo ($0.01 \leq ITSE_{servo} \leq 0.07$). Para el índice $TVU_{regulatorio}$ la magnitud para el control tomado de referencia corresponde al valor cero (0.0). Mientras que para las soluciones que se proponen su magnitud para este índice se encuentran en el intervalo ($0.04 \leq TVU_{regulatorio} \leq 0.16$), entonces, se puede decir, que éste índice no depende del valor de la estabilidad para tener un valor mínimo ya que como se puede observar en la misma Figura (4.34 c). Finalmente para el índice TVU_{servo} su valor para el control de referencia ([Rajinikanth y Latha, 2012b](#)) es de cero(0.0), en cambio para el conjunto de soluciones propuestas su magnitud para este índice aumenta, se encuentra en el rango ($0.5 \leq TVU_{servo} \leq 0.86$).

Como conclusión general del análisis del frente de Pareto para el concepto de diseño PIDn (Fig. 4.33), se puede observar que a excepción de índice $ITSE_{regulatorio}$, la región que coincide con el control tomado de referencia ([Rajinikanth y Latha, 2012b](#)) y que además es la que tiene mayor diversidad en soluciones es la región clasificada con estabilidad intermedia (4.34 b). Entonces, tomando en cuenta estos detalles podría considerarse la mejor opción para los otros índices, $ITSE_{servo}$, $TVU_{regulatorio}$ y $ITSE_{servo}$.

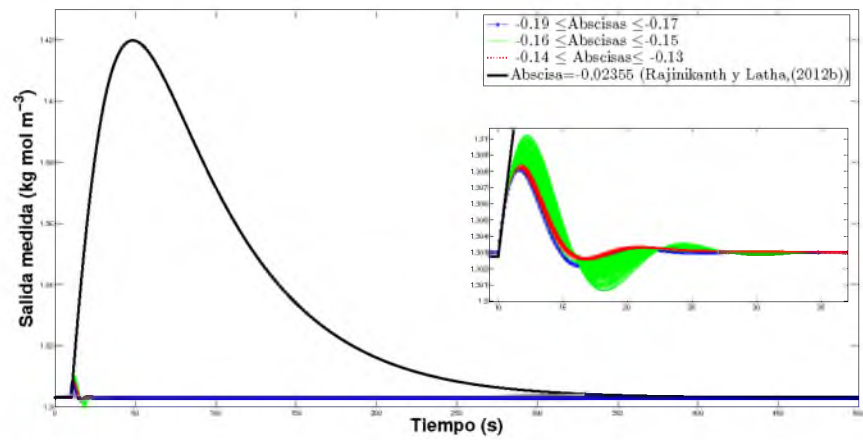
4.5.5. Evaluación del conjunto Pareto en el sistema controlado en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PIDn

Para mayor claridad en el análisis en el dominio del tiempo, se ha clasificado en tres principales grupos (regiones) en base a la abscisa espectral de cada solución que forma del P_s . Las soluciones identificadas con el color azul, es el grupo con las abscisas espectrales más negativas y por ende son las soluciones con mayor estabilidad, además estas se encuentran el intervalo ($-0.19 \leq abscisas \leq -0.17$). El segundo grupo son soluciones identificadas en color verde, corresponden al grupo de abscisas con estabilidad intermedia (de acuerdo la clasificación establecida) y éstas se encuentran

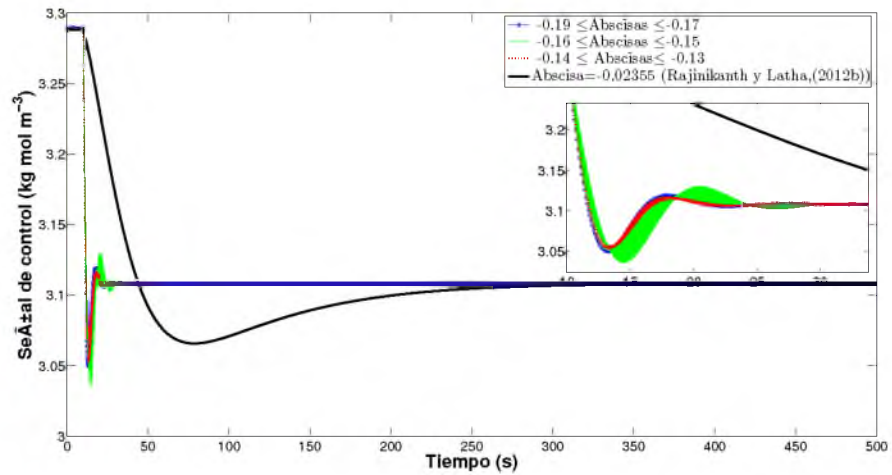
Capítulo 4. Caso de Estudio

acotadas por el intervalo $(-0.16 \leq \text{abscisas} \leq -0.15)$. El tercer grupo, son las soluciones identificadas con el color rojo, corresponden al grupo de abscisas con menor estabilidad y se encuentran acotadas por el intervalo $(-0.14 \leq \text{abscisas} \leq -0.13)$.

Es importante señalar que esta misma clasificación se aplica tanto a la señal de salida del sistema como a la señal de control, así como también se aplica para el escenario regulatorio como para el escenario servo.



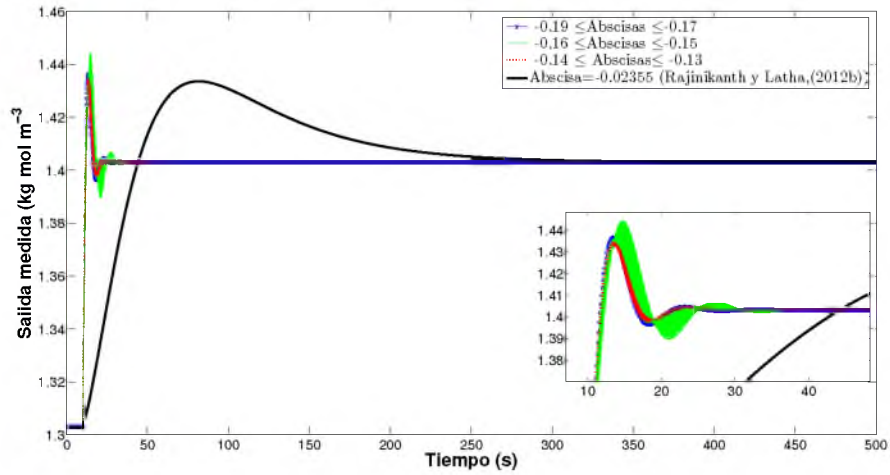
(a) Salida medida del sistema controlado, para el un concepto de diseño PIDn.



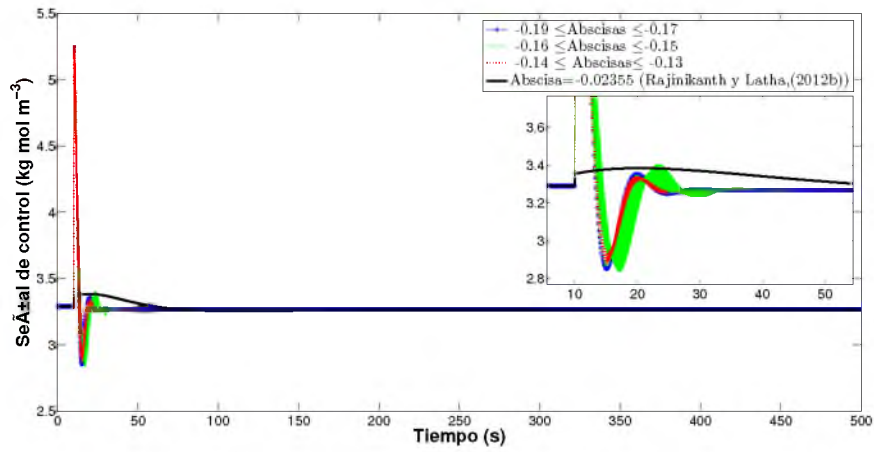
(b) Señal de control, para el concepto de diseño PIDn.

Figura 4.35: Señal de salida y de control para un concepto de diseño PIDn. Escenario regulatorio

4.5. Concepto de diseño PIDn



(a) Salida medida del sistema controlado, para el concepto de diseño PIDn.



(b) Señal de control, para el concepto de diseño PIDn.

Figura 4.36: Señal de salida y de control para un concepto de diseño PIDn.

De acuerdo a la clasificación anterior. En la Figura (4.35 a). se muestra la salida del sistema en escenario regulatorio y se observa que la señal que ha tomado de referencia (Rajinikanth y Latha, 2012b) tiene un sobresalto y un tiempo de asentamiento muy grande aproximadamente en un rango de 300 y 350 segundos en comparación con las soluciones obtenidas por optimización que tienen un sobresalto y un tiempo de asentamiento menor, aproximadamente entre 30 y 35 segundos.

En la misma Figura (4.35 a) se hace un acercamiento para observar más a detalle el sobresalto y tiempo de asentamiento para las soluciones obtenidas por optimización. Por ejemplo, se puede observar que las soluciones con menor sobresalto y bajosalto son las de color azul (y corresponden las más estables) y visualmente se observa que tienen un menor tiempo de estabilización. Para las soluciones con estabilidad intermedia (color verde), se observa que estas muestran un mayor sobresalto y bajo salto, así como también se observa que el tiempo de estabilización es mayor con respecto a las otras dos regiones. Ahora bien, para las soluciones con menor estabilidad (color rojo) se observa que tienen un sobresalto mayor que las soluciones con mayor estabilidad pero menor que las soluciones con estabilidad intermedia. Así también se observa que el tiempo de estabilización es semejante al de las soluciones con mayor estabilidad aproximadamente entre 25 y 30 segundos.

Para la señal de control (Fig. 4.35 b) del escenario regulatorio, se observa un control muy suave en la solución propuesta por Rajinikanth y Latha (2012b) y con un tiempo de estabilización mayor en comparación con las soluciones propuestas (obtenidas por optimización). Ahora bien, dentro de las soluciones propuestas se observa que grupo de las soluciones en color verde (con estabilidad intermedia) tienen un sobre salto y bajo salto mayor. Posteriormente le sigue el grupo de soluciones en color azul (más estables) y por último sigue el grupo de soluciones en color rojo (menos estables) con un sobre salto y bajo salto menor también se puede observar que las soluciones propuestas, el comportamiento del control es muy agresivo, pero su tiempo de asentamiento es menor aproximadamente entre 25 y 30 segundos en comparación con la propuesta de Rajinikanth y Latha (2012b) que tiene un tiempo de asentamiento mayor, aproximadamente entre 300 y 350 segundos.

Continuando con el análisis en el dominio del tiempo. En la Figura 4.36 a, se muestra la salida del sistema ante cambios servo y se puede observar que la salida de la solución tomada de referencia (Rajinikanth y Latha, 2012b) tiene un sobre salto menor o similar al conjunto de soluciones propuestas, pero con tiempo de asentamiento mucho mayor aproximadamente entre 250 y 300 segundos.

En la misma Figura 4.36a, se hace un acercamiento con el propósito de

observar más a detalle las señales obtenidas por optimización. Se observa que el grupo de soluciones identificado en color rojo ($-0.14 \leq abscisas \leq -0.13$) (poca estabilidad), es el que presenta el menor sobre salto y bajo salto, le sigue el grupo de soluciones identificadas en color azul ($-0.19 \leq abscisas \leq -0.17$) (más estable) y por último está el grupo de soluciones identificadas con el color verde ($-0.14 \leq abscisas \leq -0.13$) (estabilidad intermedia), las cuales muestran el mayor sobre salto, así como también el menor sobres salto. Puede observarse también, que indistintamente del grupo al que pertenecen todas ellas tienen un tiempo de asentamiento semejante, aproximadamente entre 30 y 35 segundos.

Para la señal de control (Fig. 4.36b) en el mismo escenario servo se puede observar que el conjunto de soluciones obtenidas por optimización presentan un control muy agresivo (sobre salto muy grande) pero con un tiempo de asentamiento pequeño, aproximadamente entre 30 y 40 segundos, en comparación con el control propuesto por [Rajinikanth y Latha \(2012b\)](#) que muestra un sobresalto mucho menor pero con un tiempo de asentamiento mayor, aproximadamente entre 50 y 100 segundos. Ahora, examinando el conjunto de soluciones propuestas, en el acercamiento que se hace en la misma Figura (4.36b), puede observarse que las soluciones con menor estabilidad ($-0.19 \leq abscisas \leq -0.17$), muestran un menor tiempo de estabilización, seguidas por el conjunto de soluciones en color azul ($-0.19 \leq abscisas \leq -0.17$) y finalmente las soluciones catalogadas con estabilidad intermedia ($-0.16 \leq abscisas \leq -0.15$) son las que muestran un sobre salto y bajo salto mayor.

4.6. Comparación de conceptos de diseño

Después de aplicar diferentes conceptos de diseño (PI, PwI, PID, PIDn) a un estado estado estacionario. Ahora es necesario hacer una comparación entre ellos y elegir el que mejor cumpla con las necesidades del diseñador, para ello, se lleva a cabo la comparación de sus frentes de Pareto y la simulación en el dominio del tiempo. Pero además, para cada concepto de diseño se calcula la media aritmética como medida cuantitativa de cada índice ($ITSE_{regulatorio}$, $ITSE_{servo}$, $TVU_{regulatorio}$, TVU_{servo}) con el fin de establecer una comparación entre ellos.

Es importante señalar que la comparación se lleva a cabo entre pares de conceptos de diseño. En este caso, entre un PI y un PwI debido a que para este caso se utilizó el modelo del Bioreactor de Cholette que es descrito por dos ecuaciones, una diferencial (Ec. 1.4) y una algebraica (Ec. 1.5). En tanto que para los conceptos de diseño PID y PIDn se utilizó sólo la ecuación diferencial (Ec. 1.4).

Entonces, de acuerdo a la explicación en el párrafo anterior se da inicio con el análisis de los frentes de Pareto PI y PwI para los índices ITSE y TVU en el escenario regulatorio y servo.

4.6.1. Comparación de frentes de Pareto entre los conceptos de diseño PI y PwI

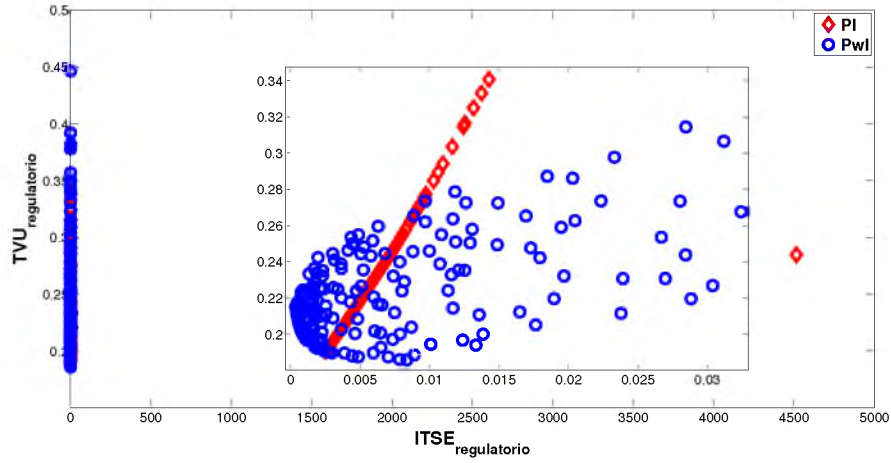
En la Figura 4.37a, se comparan los frentes de Pareto del concepto de diseño PI (rombos en color rojo) y del concepto de diseño PwI (círculo en color azul) para los índices ITSE y TVU en el escenario regulatorio.

Al efectuar un acercamiento en la misma Figura 4.37a, se puede visualizar que comparten cierta región ($0 \leq ITSE_{regulatorio} \leq 0.0026$) y ($0 \leq TVU_{regulatorio} \leq 0.15$). Además, se observa que existe mayor cantidad de soluciones para PwI y se encuentran más dispersas, en comparación con las soluciones de concepto del diseño PI, aunado a que la distribución es más estrecha.

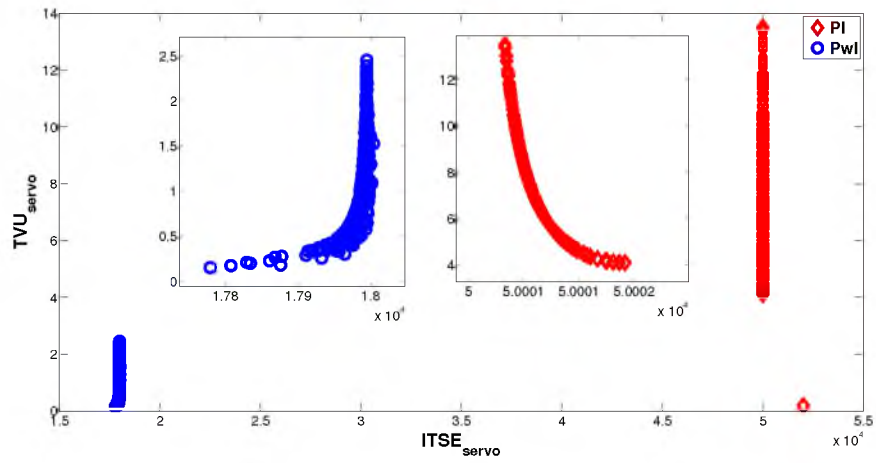
En la Figura 4.37b, se muestran los frentes de Pareto en escenario servo para PI y PwI. Como se puede observar se encuentran completamente separados uno del otro, el PwI se encuentra más cerca de origen aproximadamente en el intervalo ($1.78 \times 10^4 \leq ITSE_{servo} \leq 1.8 \times 10^4$) mientras que el PI se encuentra aproximadamente en el intervalo ($5.001 \times 10^4 \leq ITSE_{servo} \leq 5.0002 \times 10^4$).

De manera visual (Fig. 4.37)a, se puede decir que los dos conceptos de

4.6. Comparación de conceptos de diseño



(a) Comparación de índices ITSE y TVU en escenario regulatorio. Rombo en color rojo, estructura PI. Círculo en color azul, estructura PwI.



(b) Comparación de índices ITSE y TVU en escenario servo. Rombo en color rojo, estructura PI. Círculo en color azul, estructura PwI.

Figura 4.37: Comparación de frentes de Pareto PI y PwI.

diseño (PI o PwI) que comparten una región en común para el escenario regulatorio. En cambio para el escenario servo (Fig. 4.37b), se observa que los dos frentes de Pareto se encuentran separados completamente. Siendo más próximo o más cercano al origen el PwI.

Después de concluir un enfoque descriptivo. Ahora se realiza un análisis cuantitativo de los dos índices ITSE y TVU en el escenario regulatorio y servo. Para ello se obtiene la media aritmética¹ de cada uno de los índices en cada concepto de diseño: PI ($\bar{\mu}_{(PI)}$) y PwI ($\bar{\mu}_{(PwI)}$). Al comparar las medias se podrá establecer de manera global su tendencia de cada índice de desempeño, además de que puede tenerse una apreciación global de cada concepto de diseño, no importando el número de soluciones obtenidas.

Es así que en la Figura 4.38 se puede observar el valor de cada índice. Por ejemplo, para el primer índice $ITSE_{regulatorio}$, la media del concepto de diseño PI es menor que la media del concepto de diseño PwI. Para el segundo índice $ITSE_{servo}$ se invierte la magnitud de la media, ahora la media de PwI es menor que la media de PI. Para el tercer índice $TVU_{regulatorio}$ el valor de la media de PwI es menor que el valor de la media de PI y por último para el cuarto índice TVU_{servo} el valor de la media de PwI es menor que el valor de la media de PI. El comportamiento detallado se encuentra en la Tabla 4.11.

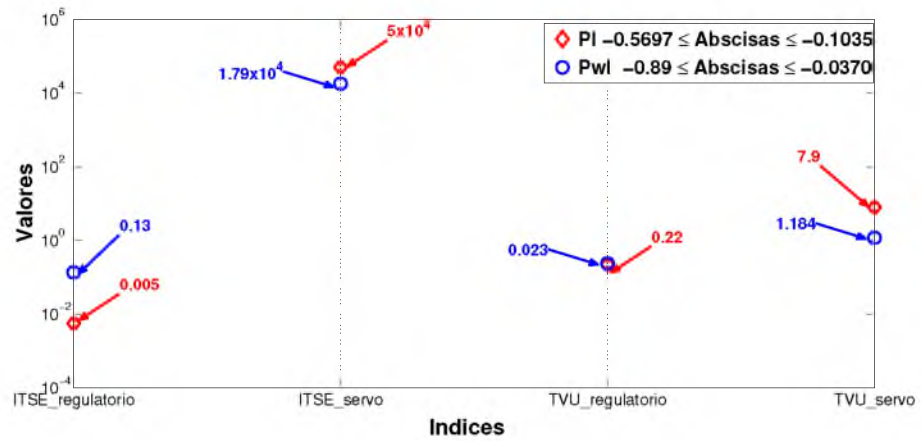


Figura 4.38: Comparación de medias para los conceptos de diseño PI y PwI

De acuerdo al análisis de relación entre los diferentes conceptos de diseño (Fig. 4.37) y a las comparaciones por medio de las medias aritméticas (Fig.4.38) que se han hecho de la figura y de la Tabla 4.11 se puede concluir

$$^1\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

4.6. Comparación de conceptos de diseño

Comparación de conceptos de diseño			
Índice de desempeño	$\bar{\mu}(\mathbf{PI})$	$\bar{\mu}(\mathbf{PwI})$	Comportamiento
$ITSE_{regulatorio}$	0.05	0.13	$\bar{\mu}(PI) < \bar{\mu}(PwI)$
$ITSE_{servo}$	5.4×10^4	1.79×10^4	$\bar{\mu}(PI) > \bar{\mu}(PwI)$
$TVU_{regulatorio}$	0.22	0.023	$\bar{\mu}(PI) > \bar{\mu}(PwI)$
TVU_{servo}	7.9	1.184	$\bar{\mu}(PI) > \bar{\mu}(PwI)$
$\bar{\mu}(\mathbf{PI})$: Media aritmética para el concepto diseño PI.			
$\bar{\mu}(\mathbf{PwI})$: Media aritmética para el concepto diseño PwI.			

Tabla 4.11: Comparación de conceptos de diseño, a partir de la media aritmética

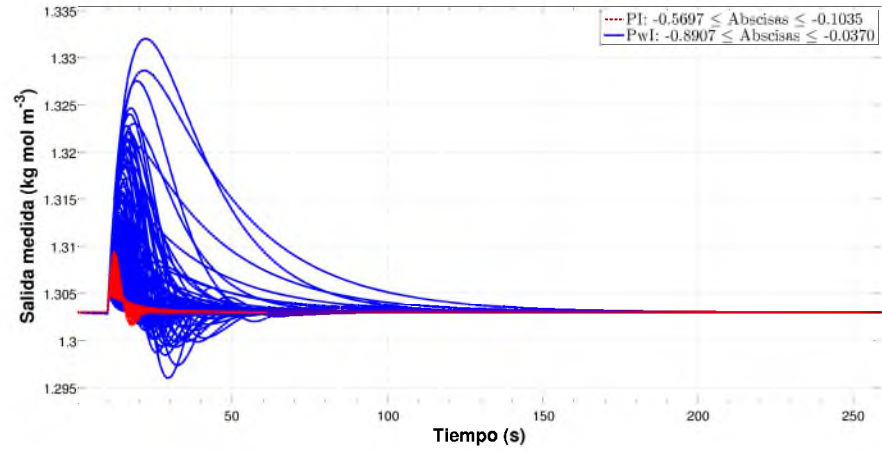
que el concepto de diseño PwI tal vez sea el más apropiado que el concepto de diseño PI.

4.6.1.1. Simulación en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PI y PwI. Escenario regulatorio

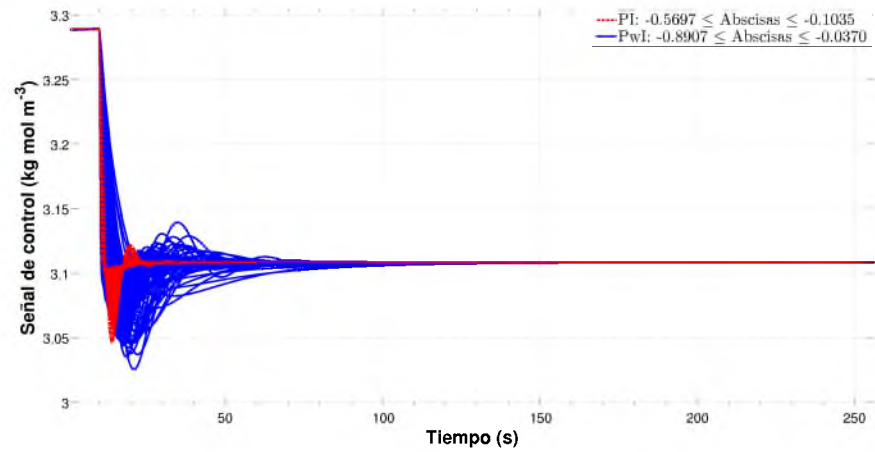
Con la finalidad de complementar y concretar el análisis de la comparación de conceptos de diseño ahora se lleva a cabo un proceso de simulación en el dominio del tiempo de tal manera que el análisis sea lo más integral posible.

Para ello en la Figura 4.39a, se muestra la señal de salida para cada uno de los conceptos de diseño. Se observa que el PI (color rojo) tiene un menor sobresalto y bajosalto con un tiempo de asentamiento menor, en cambio el PwI (color azul) tiene algunas soluciones que tiene un sobresalto muy pronunciado con un tiempo de asentamiento muy grande a comparación del PI. También algunas soluciones tienen un bajosalto mayor que las del PI.

En la Figura 4.39b, de igual manera, se muestra la señal de control para los dos conceptos de diseño. Para PI se observar un control sensible al cambio regulatorio pero con un tiempo de estabilización pequeño. Ahora para el PwI, se observa un control no muy sensible al cambio regulatorio y con un tiempo de estabilización mayor que el PI, pero en general se puede decir que su control es aceptable.



(a) Señal de control. Escenario regulatorio para el concepto de diseño PI y PwI.



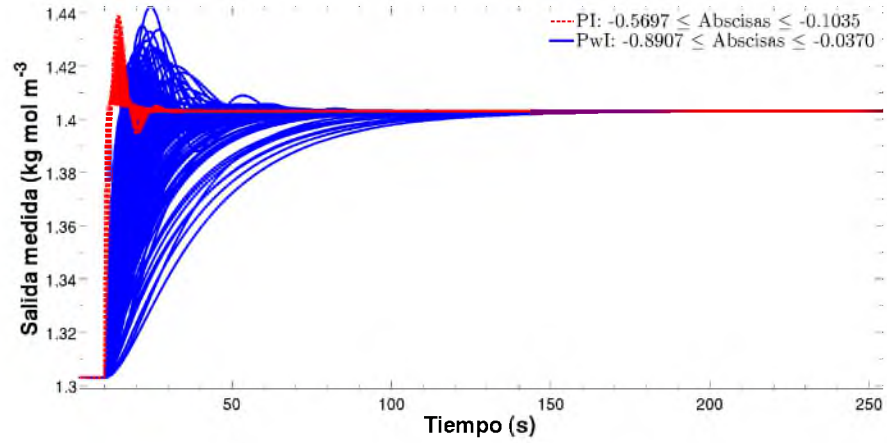
(b) Señal de control. Escenario regulatorio para el concepto de diseño PI y PwI.

Figura 4.39: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PI y PwI en el escenario Regulatorio.

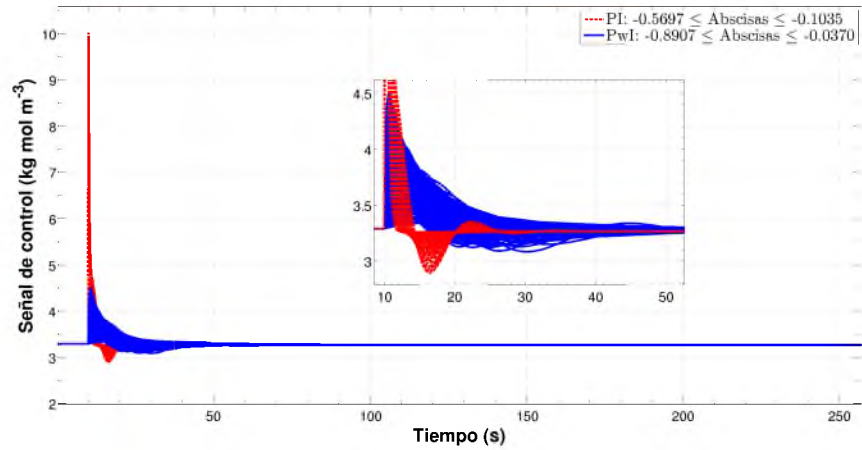
4.6.1.2. Simulación en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PI y PwI. Escenario servo

En la Figura 4.40a, se muestra la salida servo para el concepto de diseño PI y PwI. Para el PI (color rojo) se observa un sobre salto similar a algunas soluciones del PwI (color azul), también existen algunas soluciones que presentan un bajosalto pero aún así presentan un tiempo de asentamiento menor, aproximadamente entre 30 y 40 segundos. Para el concepto de diseño PwI se observa un conjunto de soluciones con un sobresalto menor e igual al PI y algunas otras no tienen sobresalto, pero su tiempo de asentamiento es mayor, aproximadamente entre 100 y 150 segundos.

Para este mismo escenario servo (Fig. 4.40b), en la señal de control para el PI, se observa que es muy sensible al cambio, como se puede observar en la misma Figura y aunque su tiempo de estabilización es menor aproximadamente entre 25 y 35 segundos en comparación con el PwI. Ahora bien, con respecto a la señal del concepto de diseño PwI, se observa una señal de control con un sobresalto mucho menor que el concepto de diseño PI y de igual manera puede observarse que su tiempo de estabilización es mayor que las señales de control del PI.



(a) Señal de salida. Escenario servo para el concepto de diseño PI y PwI.



(b) Señal de control. Escenario servo para el concepto de diseño PID y PwI.

Figura 4.40: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PI y PwI en el escenario servo.

4.6.2. Comparación de frentes de Pareto entre los conceptos de diseño PID y PIDn

De igual manera que el comparativo de los conceptos de diseño PI y PwI, se puede realizar un comparativo para los conceptos de diseño PID y PIDn.

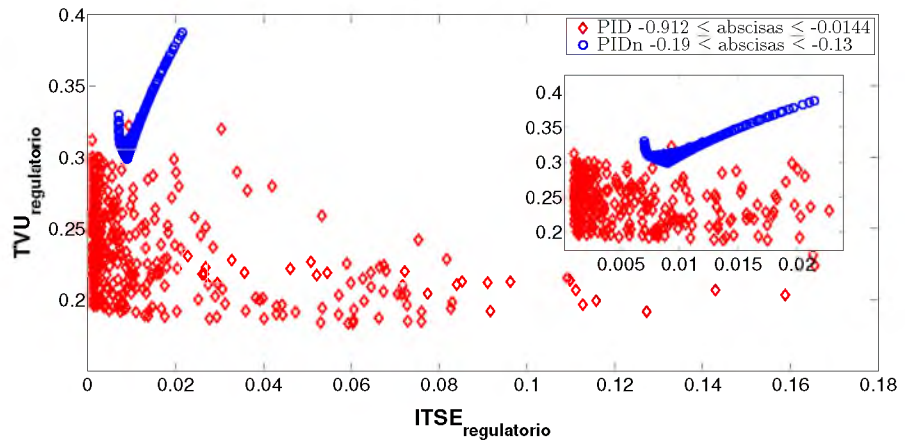
Por lo tanto, en la Figura (4.41) se muestra el frente de Pareto de cada uno de ellos, tanto para el escenario regulatorio (Fig. 4.41a) como para el escenario servo (Fig. 4.41b). El concepto de diseño PID se encuentra representado en color rojo y el concepto de diseño PIDn se encuentra representado en color azul.

Analizando con más a detalle el comportamiento se puede describir lo siguiente (Fig. 4.41a): A pesar de que los frentes de Pareto se encuentran muy cercanos uno del otro, solo comparten una región muy pequeña. Por ejemplo, para el índice $ITSE_{regulatorio}$ las soluciones del frente de Pareto del PID se encuentran más dispersas, además se encuentran más cercanas al origen, en comparación con las soluciones del concepto de diseño PIDn que muestra una dispersión muy estrecha. Con respecto al índice $TVU_{regulatorio}$ se observa que las soluciones del frente de Pareto del PID también se encuentran más cercanas al origen en comparación con las soluciones del frente de Pareto PIDn, las cuales tienden a alejarse del origen. Por consiguiente, para el escenario regulatorio, se puede concluir que el concepto de diseño PID domina al concepto de diseño PIDn.

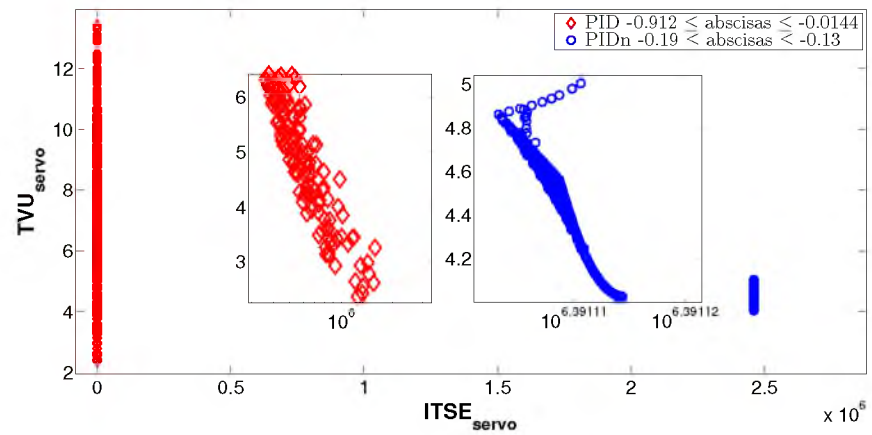
Para el escenario servo (Fig 4.41b) se observa que los frentes de Pareto se encuentran completamente separados. Por ejemplo, para el caso del índice $ITSE_{servo}$ los dos frentes de Pareto (PID y PIDn) su distribución es muy estrecha, pero el PID se encuentra más cercano al origen, por lo que se puede decir que el PID domina al PIDn. Para el índice TVU_{servo} de igual manera se observa el concepto de diseño PID sigue dominando al PIDn.

Después de concluir un enfoque visual y descriptivo, se realiza un análisis cuantitativo de los dos índices ITSE y TVU obteniendo su media aritmética. Esto permitirá establecer de manera global la tendencia de cada uno de sus índices y además, permitirá obtener una apreciación global de cada concepto de diseño, independientemente del número de soluciones que cada uno tenga.

Por ello, en la Figura 4.42 se muestra cada concepto de diseño con su correspondiente valor de la media de cada índice. Se puede observar que para el concepto de diseño PIDn, la media del índice $ITSE_{regulatorio}$ es menor en magnitud que la media del mismo índice para el concepto de diseño PID. Para el índice $ITSE_{servo}$ el valor de la media para el PID es menor que la media del PIDn el cual incrementa su magnitud de manera considerable.



(a) Comparación de índices ITSE y TVU en escenario regulatorio.



(b) Comparación de índices ITSE y TVU en escenario servo.

Figura 4.41: Comparación de frentes de Pareto PID y PIDn.

4.6. Comparación de conceptos de diseño

Para los índices de control, en el $TVU_{regulatorio}$ se observa que la media del PID es ligeramente menor que la media del PIDn y para el índice TVU_{servo} la media del PIDn es menor que la media del PID. Un resumen detallado del comportamiento puede observarse en la Tabla 4.42.

Comparación de conceptos de diseño			
Índice de desempeño	$\bar{\mu}(\text{PID})$	$\bar{\mu}(\text{PIDn})$	Comportamiento
$ITSE_{regulatorio}$	0.019	0.0098	$\bar{\mu}(\text{PID}) > \bar{\mu}(\text{PIDn})$
$ITSE_{servo}$	0.48	2.46×10^6	$\bar{\mu}(\text{PID}) < \bar{\mu}(\text{PIDn})$
$TVU_{regulatorio}$	0.233	0.314	$\bar{\mu}(\text{PID}) < \bar{\mu}(\text{PIDn})$
TVU_{servo}	7.506	4.51	$\bar{\mu}(\text{PID}) > \bar{\mu}(\text{PIDn})$

$\bar{\mu}(\text{PI})$: Media aritmética para el concepto diseño PID.
 $\bar{\mu}(\text{PwI})$: Media aritmética para el concepto diseño PIDn.

Tabla 4.12: Comparación de conceptos de diseño PID y PIDn, a partir de la media aritmética

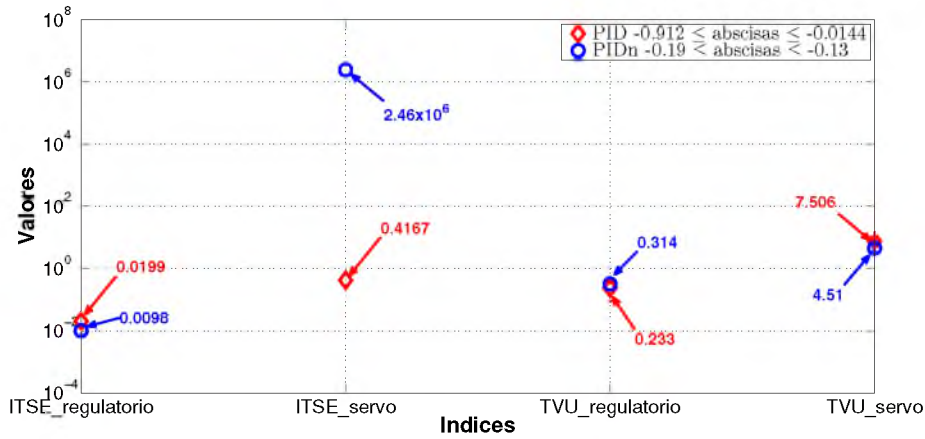


Figura 4.42: Comparación de medias para los conceptos de diseño PID y PIDn

Ahora que ya se tiene una medida cuantitativa, es interesante observar ahora como es su comportamiento en el dominio del tiempo, este análisis se llevará a cabo en la siguiente sección.

4.6.3. Simulación y comparación en el dominio del tiempo entre los conceptos de diseño PID y PIDn en escenario regulatorio

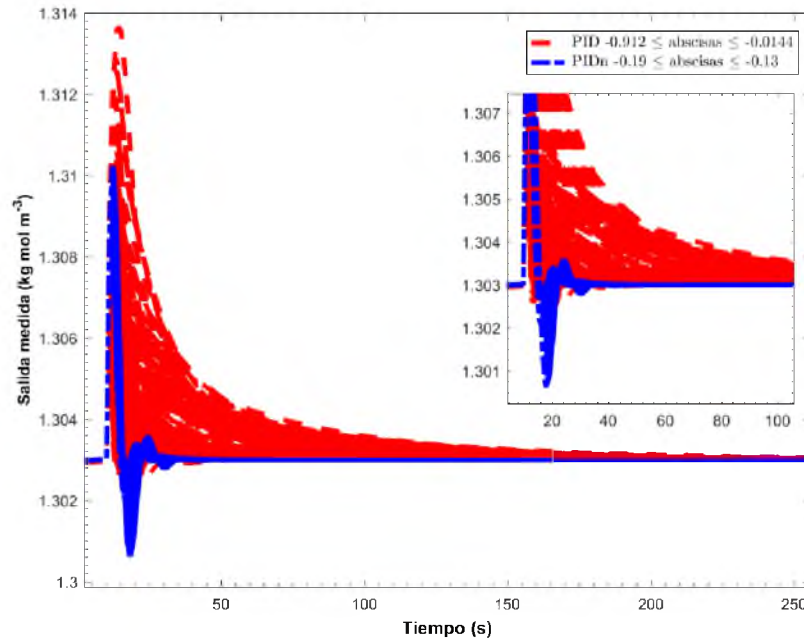
Como se mencionó anteriormente otro método de comparación entre conceptos de diseño es realizando una simulación numérica en el dominio del tiempo.

Es por ello, que en la Figura 4.43a, se muestra la salida en el escenario regulatorio del concepto de diseño PID y del concepto de diseño PIDn. Se puede observar que para el PID, muchas soluciones tienen un sobresalto similar al concepto de diseño PIDn, además existen dos soluciones que tienen un sobresalto muy pronunciado y un tiempo de asentamiento mayor, aproximadamente entre 200 y 250 segundos. En cambio para el concepto de diseño PIDn se observa que todas sus soluciones presentan un sobresalto menor que el PID y a pesar de que también presentan un bajosalto, su tiempo de asentamiento es menor, aproximadamente entre 30 y 40 segundos.

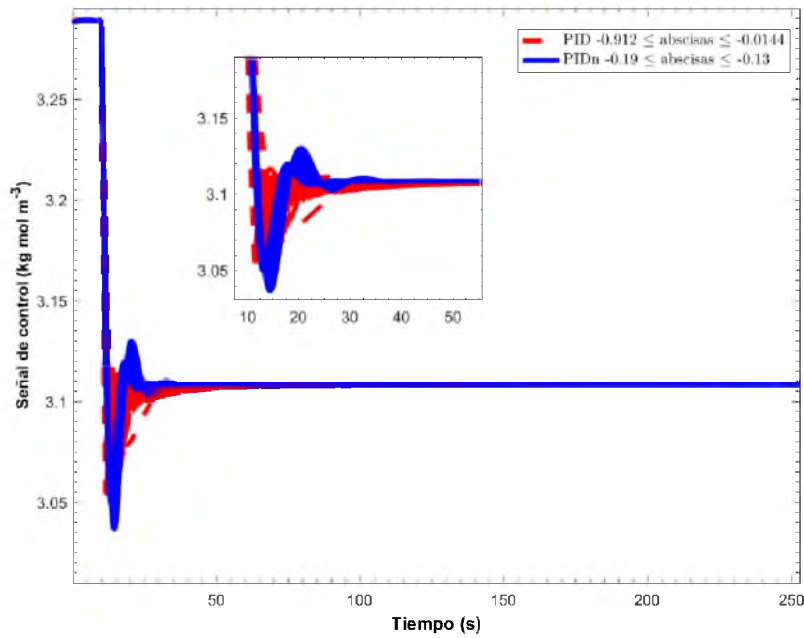
Continuando con el análisis en escenario regulatorio, en la Figura 4.43b, se muestra el comportamiento de la señal de control para el concepto de diseño PID (color rojo) y para el concepto de diseño PIDn (color azul). En principio, se observa que el control para el PID es ligeramente suave, no muestra cambios muy bruscos ante un cambio regulatorio, tiene un bajosalto menor que el PIDn y aunque algunas señales de control se desfasan un poco de las demás no muestran un comportamiento muy diferente, salvo que su tiempo de estabilización se incrementa, pero se observa que también logran estabilizar al sistema entre 50 y 100 segundos. Para el concepto de diseño PIDn se observa que es un poco más sensible al cambio regulatorio, ya que muestra algunas oscilaciones antes de estabilizarse, pero con todo y estas oscilaciones se observa que logra estabilizar al sistema en un intervalo aproximado de tiempo de 40 y 50 segundos.

Entonces, de manera general se puede decir que para el escenario regulatorio los dos conceptos de diseño (PID, PIDn) tienen un comportamiento hasta cierto punto similar, pero de acuerdo a lo observado en la Figura 4.41a de la sección 4.6.2 es posible que sea más adecuado elegir algunas soluciones del PID, debido a que se encuentra más cercano al origen.

4.6. Comparación de conceptos de diseño



(a) Señal de salida. Escenario regulatorio para el concepto de diseño PID y PIDn.



(b) Señal de control. Escenario regulatorio para el concepto de diseño PID y PIDn.

Figura 4.43: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PID y PIDn en el escenario regulatorio.

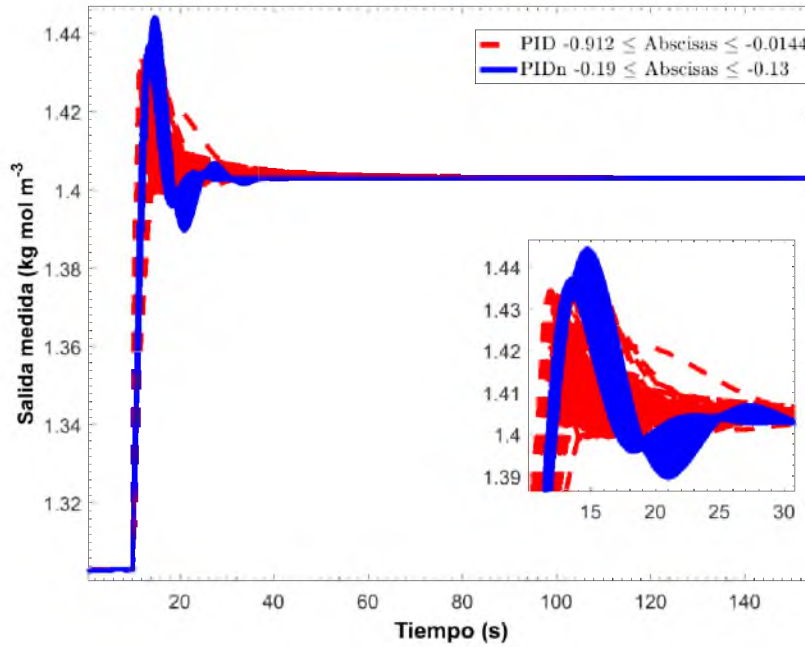
4.6.3.1. Simulación en el dominio del tiempo para el concepto de diseño PID y PIDn. Escenario servo

Para el escenario servo, también se lleva a cabo un análisis en el dominio del tiempo. Por lo tanto, en la Figura 4.44a se muestran los conceptos de diseño PID y PIDn. Para el PID, se puede apreciar que existe un mayor número de soluciones y como consecuencia es mayor también el intervalo de abscisas ($-0.912 \leq \text{Abscisas} \leq -0.0144$) en comparación con el PIDn cuyas abscisas se encuentran en el intervalo ($-0.19 \leq \text{Abscisas} \leq -0.13$). Con respecto a su comportamiento en simulación se puede observar que todas las soluciones del PID presentan un sobresalto menor que el concepto de diseño PIDn. Con respecto al tiempo de asentamiento, se observa que muchas de las soluciones tienen un tiempo de asentamiento entre 30 y 60 segundos aproximadamente. Para el concepto de diseño PIDn se aprecia que es más sensible al cambio servo, ya que se pueden apreciar varias oscilaciones (sobresaltos y bajosalto) no obstante a estos cambios, se logra controlar el sistema aproximadamente en un tiempo de 40 y 50 segundos.

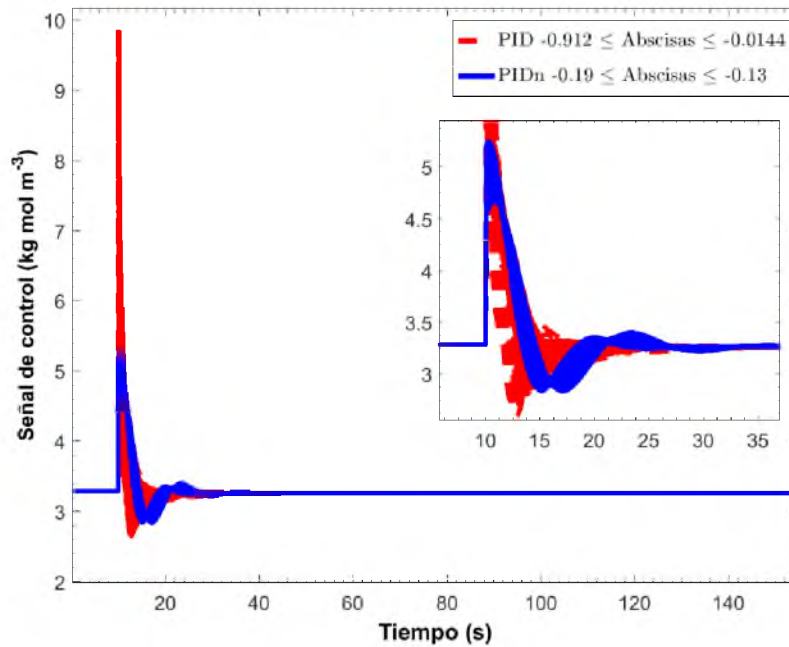
En la Figura 4.44b, se puede apreciar que para el concepto de diseño PID, el control es muy sensible al cambio servo (tiene un sobresalto muy grande en comparación con la señal de control PIDn), pero aún así, se observa que su tiempo de estabilización no es muy grande, aproximadamente se encuentra entre 25 y 40 segundos en su mayoría. Para el concepto de diseño PIDn el control es más suave (no es tan sensible al cambio servo), en comparación con el PID y aunque presenta varias oscilaciones antes de la estabilizarse, de igual manera no presenta tiempos de estabilización demasiado largos, pero sí mayores que los tiempos del PID. Sus tiempos de estabilización son aproximadamente entre 30 y 40 segundos.

Por lo anterior, en general se puede destacar, que los dos conceptos de diseño logran estabilizar el sistema en lazo cerrado, evidentemente cada uno con sus propias ventajas y desventajas explicadas anteriormente, ya que los sobresaltos y bajosalto de cada uno con sus tiempos de asentamiento respectivos se compensan. Pero de acuerdo a la comparación de los frentes de Pareto de la figura 4.41b en la sección 4.6.2 el concepto de diseño PID podría elegirse debido a que sus soluciones se encuentran más cercano al origen por lo tanto sus soluciones podrían presentar un mejor desempeño.

4.6. Comparación de conceptos de diseño



(a) Señal de salida. Escenario servo para el concepto de diseño PID y PIDn.



(b) Señal de control. Escenario servo para el concepto de diseño PID y PIDn.

Figura 4.44: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PID y PIDn en el escenario servo.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones

A lo largo de la presente investigación se logró demostrar como la comparación de conceptos de diseño en ingeniería de control le permiten al diseñador realizar un estudio más profundo y minucioso acerca de cada uno de ellos independientemente de la estructura de control que se haya utilizado (PI, PwI, PID, PIDn). En esta sección se presentan conclusiones de estabilidad en los sistemas, conclusiones de estabilidad en los sistemas, conclusiones de conceptos de diseño y conclusiones de comparativo de conceptos de diseño que pueden pudieron ser obtenidas en el presente trabajo de investigación.

5.1.1. Conclusiones de estabilidad en los sistemas

Establecer una región de estabilidad para un sistema fue muy importante, debido a que de esta manera se garantiza que las soluciones a implementar al menos cumplen cierto requisito (logran estabilizar el sistema) ya que de lo contrario no logran estabilizar a dicho sistema.

La región de estabilidad sirvió para poder establecer (acotar) un espacio de búsqueda inicial, el cual sirve como punto de partida para el proceso de optimización. El procedimiento de encontrar una región estable puede ser aplicable para cualquier concepto de diseño ya que se basa en la abscisa espectral de la matriz característica del sistema en lazo cerrado para cada una de las ganancias del controlador.

Por lo tanto, es importante mencionar que la región de estabilidad es particular para cada estructura de control y que proporciona al DM o ingeniero de control algún indicio sobre un intervalo pertinente para el proceso de optimización.

5.1.2. Conclusiones sobre sintonización de conceptos de diseño

Tomando como base los resultados de la región de estabilidad, se establecieron los límites (intervalos) de optimización permitidos para de cada concepto de diseño. Se establecieron también, dos índices que han sido ampliamente utilizados para medir el desempeño de un sistema. El primero corresponde a la integral del cuadrado del error multiplicado por el tiempo (ITSE) y el segundo a la variación total del control (TVU).

Para la sintonización de los conceptos de diseño se tomaron en cuenta las perturbaciones en la entrada exógena (cambios regulatorio) y las perturbaciones en la entrada de referencia (cambios servo), esto con la finalidad de contemplar un escenario lo más cercano posible al funcionamiento real del sistema.

Una vez establecido lo anterior, se llevó a cabo el proceso de optimización mediante el algoritmo de optimización multiobjetivo sp-MODE, obteniéndose así el conjunto y frente de Pareto para cada concepto de diseño (PI, PwI, PID y PIDn). Posteriormente, cada conjunto de Pareto fue evaluado en el sistema no lineal en el dominio del tiempo.

Se utilizaron controladores propuestos en bibliografía obtenidos mediante diferentes metodologías de sintonización que en su mayoría fueron obtenidos por el método de síntesis. Posteriormente, se realizó un comparativo entre los controladores obtenidos y los de bibliografía tanto para el conjunto de Pareto como para frente de Pareto en el dominio del tiempo.

Como resultado de las diferentes comparaciones que se realizaron, se puede concluir que las soluciones obtenidas por optimización superaron al control tomado de referencia en bibliografía. Esto debido a que la optimización multiobjetivo no está sujeta a restricciones que supone una restricción lineal.

5.1.3. Conclusiones sobre comparativos de conceptos de diseño

Con los cuatro conceptos de diseño que se sintonizaron (PI, PwI, PID, PIDn) y que fueron aplicados al sistema de estudio (Bioreactor de Cholette) se realizó una comparación entre ellos, a partir de su respectivo frente de Pareto. El primer caso de comparación se realizó entre los conceptos de diseño PI y PwI debido a que para estos dos conceptos se utilizó el modelo de Cholette que incluye la ecuación diferencial (Ec. 1.4) y la ecuación algebraica (Ec. 1.5) en un punto de operación en específico (condición de operación 1).

El segundo caso de comparación se llevó a cabo entre los conceptos PID y PIDn ya que se utilizó el modelo que solamente incluye la ecuación diferencial (Ec. 1.4) en un punto de operación en específico (condición de operación 2).

Para los dos casos, se llevó a cabo un contraste entre ambos frentes de Pareto, observando la distribución de sus soluciones, si compartían alguna región en común y cual se encontraba más cercano al origen con el fin de establecer alguna preferencia entre ellos. Después, para cada índice (ITSE, TVU) de cada concepto de diseño se obtuvo la media aritmética y de igual manera se realizó una comparación tomando como base la magnitud de cada uno de ellos de manera global. Finalmente, se realizó una comparación en el dominio del tiempo con el objetivo de observar algunas semejanzas y diferencias (sobresaltos, bajosaltos, tiempo de asentamiento) entre ambos conceptos de diseño.

Para la condición de operación 1, se puede concluir que el concepto de diseño PwI domina al concepto de diseño PI en los índices $ITSE_{servo}$, $TVU_{regulatorio}$, TVU_{servo} .

Para la condición de operación 2, se puede concluir que el concepto de diseño PID domina al concepto de diseño PIDn en los índices $ITSE_{servo}$ y $TVU_{regulatorio}$. En tanto que el concepto de diseño PIDn domina al PID en los índices $ITSE_{regulatorio}$ y TVU_{servo} .

Se puede concluir en esta sección que los índices son cooperativos o antagónicos dependiendo de la condición de operación, específicamente considerando la ecuación algebraica que modela el bypass que presenta el bio-reactor.

5.1.4. Trabajo futuro

Si bien, este trabajo de tesis permitió desarrollar una metodología para el proceso de sintonización y evaluación de diferentes conceptos de diseño (estructuras de control) a través de un proceso de optimización multiobjetivo. Sin embargo, hay otros aspectos que pueden desarrollarse y que permitirán ampliar el conocimiento sobre el proceso de sintonización, la comparación y la evaluación de diferentes conceptos de diseño. Tal es el caso de:

1. Reducir el tamaño de paso para el algoritmo que obtiene la región de estabilidad, principalmente para estados estacionarios inestables.
2. Utilizar esta metodología de sintonización para diferentes conceptos de diseño en diferentes bioreactores que presenten multiplicidad de

estados estacionarios.

3. Realizar un análisis de cada concepto de diseño utilizando otras herramientas como diagramas de nivel para la toma de decisiones multicriterio.

5.1.5. Limitaciones

Asociado a lo anterior, durante el desarrollo del proyecto de tesis se pudieron detectar oportunidades de mejora, como por ejemplo:

1. Los resultados hasta ahora obtenidos son para cuatro conceptos de diseño aplicados al mismo punto operación. Por lo tanto, se requiere hacer un estudio más exhaustivo abarcando más conceptos de diseño, como: un PID borroso (PID_{Fuzzy}), un PID fraccionario ($PI^{\lambda}D^{\mu}$), para evaluar el sistema de estudio; lo que proporcionará una mejor comprensión global de los diferentes conceptos de diseño aplicados al sistema de estudio.
2. Incrementar el tiempo de optimización y simulación superior a 1000 segundos, permitirá observar de manera más completa el comportamiento del sistema. Sin embargo, para ello se requiere un equipo de cómputo más robusto.

Apéndice

Apéndice A

Torralba-Morales L.M., Reynoso-Meza G., García-Alvarado M.A.
y Carrillo-Ahumada J. “*Jornadas de Actualización e Investigación y
desarrollo en Alimentos*”. Veracruz, Veracruz. 11 y 13 de Febrero de 2015.



Otorga la presente
Constancia
a

**L.M. Torralba-Morales, G. Reynoso-Meza, M.A. García Alvarado,
J. Carrillo-Ahumada**

Por haber presentado el **Cartel:**
“Sintonización de Controladores Lineales mediante Optimización Multiobjetivo y Herramientas de Decisión”

Dentro de las Jornadas de Actualización en Investigación
y Desarrollo de Alimentos,
Realizadas los días 11, 12 y 13 de Febrero de 2015, con motivo de los 16 años de la Unidad de
Investigación y Desarrollo en Alimentos de este Instituto.

H. Veracruz, Ver., a 13 de febrero de 2015.



Dr. Víctor José Robles Olvera
Presidente del Comité Organizador

M.A. Ángel Francisco Velasco Muñoz
Director encargado del plantel



Apéndice B

Presentación de Poster. Torralba-Morales L.M., Reynoso-Meza G., y Carrillo-Ahumada J. “*IV Jornada de Ingeniería en Alimentos*”. Tuxtepec, Oaxaca 30-31 de octubre de 2017. Por publicarse.

Día Mundial de la Alimentación | 16 de octubre de 2017



IV

JORNADA DE TRABAJO CON MOTIVO DEL
DÍA MUNDIAL DE LA ALIMENTACIÓN

LA UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

A TRAVÉS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y LOS CUERPOS
ACADÉMICOS: OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS ALIMENTARIOS Y FUNCIONALIZACIÓN
DE BIOPOLÍMEROS¹, RECURSOS NATURALES E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA² E
INVESTIGACIÓN EN SALUD³

OTORGAN LA SIGUIENTE CONSTANCIA A:

L. M. Torralba-Morales, G. Reynoso-Meza & J. Carrillo-Ahumada

Por haber obtenido el **TERCER LUGAR** en el concurso de carteles
científicos dentro del marco de la IV Jornada de trabajo con motivo del
Día Mundial de la Alimentación

**SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES ÓPTIMOS PI Y EVALUACIÓN MEDIANTE
HERRAMIENTAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA UN SISTEMA INESTABLE**



Realizada los días 30 y 31 de Octubre de 2017

M.C. Héctor López Arjona
Vice-rector Académico

VICE-RECTORIA
ACADEMICA

M.C. Miguel A. García Muñoz
Jefe de Carrera

Dr. Jesús Carrillo Ahumada
Responsable de CA¹

Dr. Erick A. Juárez Arellano
Responsable de CA²

Dra. Susana Lozano Muñoz
Responsable de CA³



Apéndice C

Memoria en extenso. **Gilberto Reynoso-Meza, Jesús Carrillo-Ahumada, Leonardi Martín Torralba Morales**. “*Pareto Front Analysis of Control Structures in Multimodel Systems: The work scenario concept introduction*”. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente Porto Alegre - RS, 1º- 4 de Outubro de 2017.

PARETO FRONT ANALYSIS OF CONTROL STRUCTURES IN MULTIMODEL SYSTEMS: THE WORK SCENARIO CONCEPT INTRODUCTION.

GILBERTO REYNOSO-MEZA*, JESÚS CARRILLO-AHUMADA†, LEONARDI MARTÍN TORRALBA MORALES†

*Industrial and Systems Engineering Graduate Program (PPGEPS), Pontifical Catholic University of Parana (PUCPR), Imaculada Conceição, 1155, Zip code 80215-901, Curitiba, PR, Brazil

†Universidad del Papaloapan, Circuito Central 200, colonia Parque Industrial, Tuxtpec, Oax., 68301, México.

Emails: g.reynosomeza@pucpr.br, jcarrillo@unpa.edu.mx, leonardi@unpa.edu.mx

Abstract— Multiobjective optimisation techniques have shown to be a valuable tool for control engineering systems. Such techniques offer a suitable framework in order to analyse benefits and drawbacks of a given control structure in an overall sense, by analysing trade-off surface. Recently, design concepts comparison have been used in control systems in order to compare different controller structures. Nevertheless, to compare a control structure and its Pareto front under different circumstances, as the ones that arise working on multimodel control systems, might need a different approach. In this work, given a multimodel system we pose the following question: *How much will the performance degrade of a Pareto optimal controller of the model subsystem A, if it undergoes a performance test in the model subsystem B?* In order to answer such question in a multicriteria decision making, we introduce the idea of work scenario concepts comparison.

Keywords— Control tuning, multimodel systems, multiobjective optimisation, Pareto front comparison, design concepts, work scenario concepts

1 Introduction

Recently Multiobjective Optimisation (MOO) techniques have shown to be a valuable tool for controller tuning applications (Reynoso-Meza et al., 2014; Meza et al., 2016). They enable the designer or decision maker (DM) having a close embedment into the tuning process since it is possible to take into account each design objective individually; they also enable comparing design alternatives (*i.e.* different controllers), in order to select a tuning fulfilling the expected trade-off among conflicting objectives.

In this context, it has shown to be an interesting idea to compare different Pareto fronts; for controller tuning applications it is a useful way to evaluate different ways which solve the Multi-objective problem (MOP) at hand (Meza et al., 2016). That is, when different controller structures (or design concepts) are applied in a control loop. Therefore, the overall trade-off surface is analysed in order to appreciate benefits and drawbacks for each design concept (Mattson and Messac, 2005).

Nevertheless, Pareto front comparison might be required under different circumstances, beyond the design concepts comparison. In the controller tuning context, the main question posed for a design concept comparison is: *Which controller structure is more appropriated, given its trade-off surface?* In spite of the usefulness of such analysis, a different one might be needed for different circumstances. For example, the multimodel framework approach (Adeniran and El Ferik, 2017; El Ferik and Adeniran, 2017) for nonlinear systems have shown to be a powerful

control tool for complex processes. Main idea is to decompose the nonlinear model in subsystems, in order to facilitate its analysis and control. In this work, given a multimodel system we pose the following question: *How much will the performance degrade of a Pareto optimal controller of the model subsystem A, if it undergoes a performance test in the model subsystem B?*

To answer such a question in a multicriteria framework, we introduce the idea of **work scenario concepts comparison** and a basic methodology to carry on with such a task. This kind of analysis might be useful for systems with steady state multiplicities, time varying systems, and systems with variable dynamics. The remainder of this work is as follows: firstly in Section 2 it is presented a brief background on MOO and design concepts comparison. Afterwards, in Section 3 the idea of work scenario concepts is introduced and a minimal methodology is presented, which is validated in Section 4. Finally, some conclusions are given as well as future research on the topic.

2 Background

In order to describe the tuning approach of this paper, some preliminaries on controller tuning, multiobjective optimisation and design concepts comparison are needed.

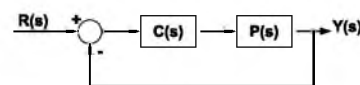


Figure 1: Basic control loop.

Apéndice D

Proyecto interno. **Carrillo-Ahumada J.**, **Torralba-Morales L.M.**,
Reynoso-Meza G. “*Estudio comparativo de conceptos de diseño por
medio de frentes de Pareto*”. Proyecto FO-UNPA/00017. Universidad del
Papaloapan, Campus Tuxtepec. 12 de Octubre de 2017.



Universidad del Papaloapan

Tuxtepec, Oax. a 17 de Octubre 2017

ASUNTO: Carta de Liberación de Proyecto Interno

Dr. Jesús Carrillo Ahumada
Profesor Investigador
Universidad del Papaloapan
Presente

En referencia a su proyecto de investigación "**Estudio comparativo de conceptos de diseño por medio de frentes de Pareto**", me es grato comunicarle que después de analizar el informe final presentado, se ha dictaminado que ha cumplido los compromisos académicos comprometidos en el proyecto de investigación.

Los datos básicos con los que el proyecto se encuentra registrado ante esta Vice-Rectoría son:

Clave del proyecto: FO-UNPA/0001/17

Responsable Técnico: Dr. Jesús Carrillo Ahumada

Colaboradores del proyecto:

Ing. Leonardi Martin Torralba Morales
Dr. Gilberto Reynoso Meza

Sin otro particular al cual referirme sirva la presente para enviarle un cordial saludo.

Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Bou lo tama, chi ji jú



Jax
M. EN C. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA.
Vice-Rector Académico
Universidad del Papaloapan
**VICE-RECTORIA
ACADEMICA**

c.c.p. Archivo del profesor
Archivo FO-UNPA

Campus Loma Bonita

Av. Ferrocarril S/N, Col. Ciudad Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca C.P. 68400
Tel/Fax: 01 281 872 92 30

www.unpa.edu.mx

Campus Tuxtepec

Circuito Central N° 290, Col. Parque Industrial C.P. 68200
Tel/Fax: 01 287 376 9240

Referencias

- Agrell, P., y Wikner, J. (1996). An MCDM framework for dynamic systems. *International Journal of Production Economics*, 45(1), 279-292.
- Aguila-Camacho, N., y Duarte-Mermoud, M. (2013). Fractional adaptive control for an automatic voltage regulator. *ISA Transactions*(52), 807-815.
- Ajmeri, M., y Ali, A. (2015). Two degree of freedom control scheme for unstable processes with small time delay. *ISA Transactions*, 56, 308-326.
- Ang, K. H., Chong, G., y Li, Y. (2005). Pid control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- Astrom, K., y Hagglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA.
- Banerjee, T., Chowdhuri, S., Sarkar, G., y Bera, J. (2012). Performance comparison between GA and PSO for Optimization of PI and PID controller of direct FOC induction motor drive. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(7).
- Blasco, X., Herrero, J., Sanchis, J., y Martínez, M. (2008). A new graphical visualization of n-dimensional pareto front for decision-making in multiobjective optimization. *Information Sciences*, 178(20), 3908-3924.
- Blasco, X., Reynoso-Meza, G., Sánchez, E., y Sánchez, J. (2016). Asymmetric distances to improve n-dimensional pareto fronts graphical analysis. *Information Sciences*, 340-341, 228 - 249.
- Bonissone, P., Subbu, R., y Lizzi, J. (2009). Multicriteria decision making MCDM: a framework for research and applications. *Computational Intelligence Magazine, IEEE*, 4(3), 48-61.
- Caballero, J., y Grossmann, I. (2007). Una revisión del estado del arte en optimización. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4(1), 5-23.
- Carrillo-Ahumada, J., Páramo-Calderón, D., Aparicio-Saguilán, A., Rodríguez-Jimenes, G., y García-Alvarado, M. (2014). Approach of a measurement of linearized representation of a nonlinear system. Application to (Bio)Chemical reactors. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 631-647.

Referencias

- Carrillo-Ahumada, J., Reynoso-Meza, G., García-Nieto, S., Sanchis, J., y García-Alvarado, M. (2015). Sintonización de controladores pareto-óptimo robustos para sistemas multivariados. Aplicación en un helicóptero de 2 grados de libertad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 12, 177-188.
- Carrillo-Ahumada, J., Rodríguez-Jimenes, G., y García-Alvarado, M. (2011). Tuning optimal-robust linear MIMO controllers of chemical reactors by using pareto optimality. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 357 - 367.
- Chen, Z., Yuan, X., Ji, B., Wang, P., y Tian, H. (2014). Design of a fractional order PID controller for hydraulic turbine regulating system using chaotic non-dominated sorting genetic algorithm II. *Energy Conversion and Management*, 84, 390 - 404.
- Chi, C. (1999). *Linear systems theory and design* (Third Edition ed.). Oxford University Press.
- Chidambaram, M., y Reddy, G. (1996). Nonlinear control of systems with input and output multiplicities. *Computers and chemical Engineering*, 20(3), 295-299.
- Choi, H., Lee, H., y Kim, H. (2009). Fast detection and visualization of network attacks on parallel coordinates. *Computers and Security*, 28(5), 276 - 288.
- Coello, C., y Lamont, G. (2004). *Applications of multi-objective evolutionary algorithms* (Vol. 1). World Scientific.
- Coello, C., Lamont, G., y Veldhuizen, D. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems* (Second edition ed.). Springer link.
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley and Sons, LTD.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., y Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Duan, G.-R. (2010). *Analysis and design of descriptor linear systems* (Vol. 23).
- Elbayomy, K., Zongxia, J., y Huaqing, Z. (2008). PID controller optimization by GA and its performances on the electro-hydraulic servo control system. *Chinese Journal of Aeronautics*, 21(4), 378 - 384.
- Flott, L. (2012). Using the scatter diagram tool to compare data, show relationship. *Metal Finishing*, 110(8), 33 - 35.
- García-Alvarado, M., Ruiz-López, I., y Torres-Ramos, T. (2005). Tuning of multivariate PID controllers based on characteristic matrix eigenvalues, lyapunov functions and robustness criteria. *Chemical Engineering Science*, 60(4), 897 - 905.
- García-Nieto, S., Reynoso-Meza, G., Borrell, A., y Penaranda-Foix, F. (2014). Control system design by multicriteria selection in microwave sintering processes. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 8528-8533.

- Hendricks, E., Jannerup, O., y Sorensen, P. (2008). *Linear systems control, deterministic and stochastic methods*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Horn, J., Nafpliotis, N., y Goldberg, D. E. (1994). A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. En *Evolutionary computation, 1994. ieee world congress on computational intelligence., proceedings of the first ieee conference on* (pp. 82–87).
- Huang, H., y Chen, C. (1999). Auto-tuning of PID controllers for second order unstable process having dead time. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 32(4), 486-497.
- Ibarra-Junquera, V., y Rosu, H. (2007). PI-controlled bioreactor as a generalized liénard system. *Computers and Chemical Engineering*, 31(3), 136-141.
- Inselberg, A. (1985). The plane with parallel coordinates. *The visual computer*, 1(2), 69–91.
- Jhunjhunwala, y Chidambaram, A. (2001). PID controller tuning for unstable systems by optimization method. *Chemical Engineering Comm.*, 185(1), 91-113.
- Jin, C., Ryu, K., Sung, S., Lee, J., y Lee, I. (2014). PID auto-tuning using new model reduction method and explicit PID tuning rule for a fractional order plus time delay model. *Journal of Process Control*, 24(1), 113 - 128.
- Kasprzyk, J., Nataraj, S., Reed, P., y Lempert, R. (2013). Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. *Environmental Modelling and Software*, 42, 55 - 71.
- Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear systems* (Third ed.). Prentice-Hall.
- Knowles, J. D., y Corne, D. W. (2000). Approximating the nondominated front using the pareto archived evolution strategy. *Evol. Comput.*, 8(2), 149–172.
- Kroll, A., y Schulte, H. (2014). Benchmark problems for nonlinear system identification and control using soft computing methods: need and overview. *Applied Soft Computing*, 25, 496–513.
- Kukkonen, S., y Lampinen, J. (2005). Gde3: The third evolution step of generalized differential evolution. En *Evolutionary computation, 2005. the 2005 ieee congress on* (Vol. 1, pp. 443–450).
- Li, K., Kwong, S., Cao, J., Li, M., Zheng, J., y Shen, R. (2012). Achieving balance between proximity and diversity in multi-objective evolutionary algorithm. *Information Sciences*, 182(1), 220–242.
- Luus, R. (2000). *Iterative dynamic programming* (Chapman and Hall/CRC ed.). ISA.
- Luus, R. (2008). Optimal control of oscillatory systems by interactive dynamic programing. *Journal of Industrial and Managment Optimization*, 4(1), 1-15.

Referencias

- Marler, T., y Arora, J. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6), 369-395.
- Márquez-Rubio, J., y del Muro-Cuéllar, B. (2010). Control basado en un esquema observador para sistemas de primer orden con retardo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 09, 43-52.
- Mattson, C. A., y Messac, A. (2005). Pareto frontier based concept selection under uncertainty, with visualization. *Optimization and Engineering*, 6(1), 85-115.
- Messac, A. (2015). *Optimization in practice with matlab for engineering students and professionals*. Cambridge University Press.
- Messac, A., y Mattson, C. (2002). Generating well-distributed sets of pareto points for engineering design using physical programming. *Optimization and Engineering*, 3(4), 431-450.
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear multiobjective optimization* (Fourth Edition ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Moran, K., y Wuhler, R. (2006). X-ray mapping and interpretation of scatter diagrams. *Microchimica Acta*, 155(1-2), 209-217.
- Morilla, F. (2012). Benchmark for PID control based on the boiler control problem. *IFAC Conference on Advances in PID Control, PID'12*, 45(3), 346-351.
- Naranjani, Y., Sardahi, Y., Chen, Y., y Sun, J.-Q. (2015). Multi-objective optimization of distributed-order fractional damping. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 24(1), 159 - 168.
- Normey-Rico, J., y Camacho, E. (2009). Unified approach for robust dead-time compensator design. *Journal of Process Control*, 19(1), 38-47.
- O'Dwyer, A. (2009). *Handbook of PI and PID controller tuning rules* (Vol. 57). World Scientific.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (Quinta Edición ed.). Prentice Hall.
- Padma, S., y Chidambaram, M. (2002). Identification of unstable second-order transfer function model with a zero by optimization method. *Indian Chemical Engineer*(82), 219-225.
- Padma, S., y Chidambaram, M. (2005). Set point weighted PID controllers for unstable systems. *Chemical Engineering Communications*, 192(1), 1-13.
- Pai, N., Chang, S., y Huang, C. (2010). Tuning PI/PID controllers for integrating processes with deadtime and inverse response by simple calculations. *Journal of Process Control*, 20(6), 726 - 733.
- Pan, I., y Das, S. (2015). Fractional-order load-frequency control of interconnected power systems using chaotic multi-objective optimization. *Applied Soft Computing*, 29, 328 - 344.
- Rajinikanth, V., y Latha, K. (2012a). Controller parameter optimization for nonlinear systems using enhanced bacteria foraging algorithm. *Applied*

- Computational Intelligence and Soft Computing*, 2012.
- Rajinikanth, V., y Latha, K. (2012b). I-PD controller tuning for unstable system using bacterial foraging algorithm: A study based on various error criterion. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2012(329389).
- Reynoso-Meza, G. (2010). Design, coding and implementation of a multi-objective optimization algorithm based on differential evolution with spherical pruning: applications for system identification and controller tuning. *Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia*. URL <http://personales.alumno.upv.es/gilreyme>.
- Reynoso-Meza, G., Blasco, X., Sanchis, J., y Martínez, M. (2014). Controller tuning using evolutionary multi-objective optimisation: Current trends and applications. *Control Engineering Practice*, 28(0), 58 - 73.
- Reynoso-Meza, G., Carrillo-Ahumada, J., Boada, Y., y Picó, J. (2016). PID controller tuning for unstable processes using a multi-objective optimisation design procedure. *IFAC-PapersOnLine*, 49(7), 284–289.
- Reynoso-Meza, G., Garcia-Nieto, S., Sanchis, J., y Blasco, X. (2013). Controller tuning by means of multi-objective optimization algorithms: A global tuning framework. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 21(2), 445-458.
- Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., y Martínez, M. (2010). Design of continuous controllers using a multiobjective differential evolution algorithm with spherical pruning. *Springer Berlin Heidelberg*, 6024, 532-541.
- Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., y Martínez, M. (2013). Algoritmos evolutivos y su empleo en el ajuste de controladores del tipo PID: Estado actual y perspectivas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 10(3), 251–268.
- Rodríguez-Mariano, A., Reynoso-Meza, G., Páramo-Calderón, D., Chávez-Conde, E., García-Alvarado, M., y Carrillo-Ahumada, J. (2015). Análisis del desempeño de controladores lineales sintonizados en diferentes estados estacionarios del biorreactor de Cholette mediante técnicas de decisión multi-criterio. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(1), 167–204.
- Roy, R., Hinduja, S., y Teti, R. (2008). Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2), 697 - 715.
- Samad, T. (2017, Feb). A survey on industry impact and challenges thereof [technical activities]. *IEEE Control Systems*, 37(1), 17-18.
- Schultz, W. C., y Rideout, V. C. (1961). Control system performance measures: Past, present, and future. *IRE Transactions on Automatic Control*, AC-6(1), 22-35.
- Seshagiri, R., Rao, V., y Chidambaram, M. (2007). Simple analytical design of modified smith predictor with improved performance for unstable

Referencias

- first-order plus time delay (foptd) processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(13), 4561-4571.
- Shabani, H., Vahidi, B., y Ebrahimpour, M. (2013). A robust PID controller based on imperialist competitive algorithm for load-frequency control of power systems. *ISA transactions*, 52(1), 88-95.
- Shariati, A., Taghirad, H., y Fatehi, A. (2014). A neutral system approach to H PD/PI controller design of processes with uncertain input delay. *Journal of Process Control*, 24(3), 144-157.
- SivaramaKrishnan, S., y Tangirla. (2008). Sliding mode controller for unstable systems. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 22(1), 41-47.
- Smith, C. A., Corripio, A. B., y Basurto, S. D. M. (1991). *Control automático de procesos: teoría y práctica* (n.º 968-18-3791-6. 01-A3 LU. AL-PCS. 1.). Limusa.
- Sree, P., y Chidambaram, M. (2003a). Control of unstable bioreactor with dominant unstable zero. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 17(3), 139-145.
- Sree, P., y Chidambaram, M. (2003b). A simple method of tuning PI controllers for unstable systems with a zero. *Chem. Biochem. Eng.*, 17(3), 207-212.
- Torralba-Morales, L. M., Reynoso-Meza, G., García-Alvarado, M., y Carrillo-Ahumada, J. (2015). Sintonización de controladores lineales mediante optimización multiobjetivo y herramientas de decisión. *Jornadas de Actualización e Investigación y Desarrollo en Alimentos. Veracruz, Ver., 11-13 de Febrero de 2015*.
- Uddin, M., Mekhilef, S., Rivera, M., y Rodriguez, J. (2015). Imposed weighting factor optimization method for torque ripple reduction of IM Fed by indirect matrix converter with predictive control algorithm. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 10(1), 227-242.
- Wang, W., Huang, M., Nguyen, Q., Huang, W., Zhang, K., y Huang, T. (2016). Enabling decision trend analysis with interactive scatter plot matrices visualization. *Journal of Visual Languages and Computing*, 33, 13 - 23.
- Weise, T. (2009). Global optimization algorithms-theory and application. *Self-published*, 2.
- Witowski, K., Liebscher, M., y Goel, T. (2009). Decision making in multi-objective optimization for industrial applications - data mining and visualization of pareto data. *7th, European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria*.
- Zhang, Q., y Li, H. (2007). MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 11(6), 712-731.
- Zhang, W. (2006). Optimal design of the refined Ziegler-Nichols Proportional-Integral-Derivative Controller for stable and unstable

- processes with time delays. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(4), 1408-1419.
- Zio, E., y Bazzo, R. (2011). Level diagrams analysis of pareto front for multiobjective system redundancy allocation. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(5), 569 - 580.
- Zitzler, E., y Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257-271.