

Sintonización y comparación de conceptos de diseño aplicando la optimalidad de Pareto. Un caso de estudio del biorreactor de Cholette

Torralba-Morales, L.M.^a, Reynoso-Meza, G.^{b,*}, Carrillo-Ahumada, J.^c

^aDivisión de Estudios de Postgrado. Universidad del Papaloapan. Av. Ferrocarril s/n, CD. Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca 68400, México.

^bIndustrial and Systems Engineering Graduate Program (PPGEPS), Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), Rua Imaculada Conceição, 1155, 80215-901 Curitiba, PR, Brazil.

^cInstituto de Química Aplicada. Universidad del Papaloapan, Circuito Central 200, Colonia Parque Industrial, Tuxtepec, Oaxaca 68301, México.

To cite this article: Torralba-Morales, L.M., Reynoso-Meza, G., Carrillo-Ahumada, J. 2020. Tuning and comparison of design concepts applying Pareto optimality. A case study of the Cholette bioreactor. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 17, 190-201. <https://doi.org/10.4995/riai.2019.11424>

Resumen

El control lineal PI(D) y sus variantes, son estructuras de control (conceptos de diseño) que actualmente se siguen utilizando en procesos industriales. La elección de una estructura de control sobre otra reside en el intercambio de prestaciones entre complejidad y rendimiento. Dado que este intercambio de prestaciones normalmente estará en conflicto, un análisis desde el punto de vista multiobjetivo puede ser de interés. Desde tal perspectiva, se analizan frentes de Pareto de diferentes conceptos de diseño, con lo que se realiza una comparación global y no puntual de tales conceptos. En este trabajo se plantea una propuesta metodológica para dicha comparación en diferentes etapas. La primera, fue establecer una región de estabilidad. En la segunda etapa se consideró la región de estabilidad como espacio de búsqueda para el proceso de optimización multiobjetivo calculando un conjunto y frente de Pareto. En la tercera etapa se realizó un análisis multicriterio de los frentes de Pareto, junto con la simulación en el dominio del tiempo para las señales de salida y de control. Como caso de estudio para validar la propuesta se ha elegido el biorreactor de Cholette que presenta diferentes condiciones de operación. La metodología propuesta permite una mejor comprensión de una solución conceptual, justifica y determina el uso de un concepto de diseño cumpliendo así con las necesidades del diseñador.

Palabras clave: Control PID, conceptos de diseño, biorreactor de Cholette, control óptimo, toma de decisión.

Tuning and comparison of design concepts applying Pareto optimality. A case study of Cholette bioreactor

Abstract

The linear control PI (D) and its variants are control structures (design concepts) that are still used in industrial processes. The control engineer will prefer one over another according to a desired tradeoff among complexity and performance indices. Given that this exchange might be in conflict, an analysis using multiobjective optimisation tools could be interesting. With this perspective, different Pareto fronts from different design concepts are compared, enabling a global, and not punctual, performance comparison. In this work a global methodology for comparing design concepts in different stages was developed. The first step was to establish a region of stability. In the second stage, the stability region was considered as a search space for the multiobjective optimization process, approximating a Pareto set and front. In the third stage, a multicriteria analysis of the Pareto fronts was carried out, together with the simulation in the time domain for the output and control signals. As case study to validate this proposal the Cholette's bioreactor was selected. The proposed methodology allows a better understanding of a conceptual solution, justifies and determines the use of a design concept thus meeting the needs of the designer.

Keywords: PID control, design concepts, Cholette's bioreactor, optimum control, decision making.

*Autor para correspondencia: g.reynosomeza@pucpr.br

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

1. Introducción

A pesar del desarrollo de una amplia gama de estructuras de control, el controlador PID sigue siendo una de las estructuras de control más populares y ampliamente utilizadas en la industria ((Aström y Hägglund, 2006), (Vilanova y Alfaro, 2011), (Reynoso-Meza et al., 2013)). Se considera que más del 95 % de los controladores industriales son implementados todavía basándose en una estructura PID ((O'Dwyer, 2009), (Samad, 2017)).

El objetivo principal de un bucle básico de control es que el sistema controlado presente un comportamiento deseado propuesto por el ingeniero de control/diseñador. El comportamiento deseado se consigue mediante la sintonización de los parámetros de la estructura del controlador.

La cantidad de parámetros del controlador dependen de la estructura utilizada. Algunas de las estructuras de control más comunes son: control proporcional (P), control proporcional-integral (PI), control proporcional-integral con ponderación en el punto de consigna (PwI) entre otras. La selección de una estructura de control depende de las características deseadas del sistema en bucle cerrado, factibilidad de implementación, estabilidad, desempeño y robustez. Por ejemplo, el diseñador puede preferir entre una estructura de control PI o PIDn en lugar de una PID debido a la atenuación de los efectos del ruido. En algunos casos, la selección de los conceptos de diseño es por medio de evidencia anecdótica (como en varios temas industriales: supervisión de bucles de control (Yu et al., 2010), procesamiento industrial por lotes (Sanchez et al., 2002) y aplicaciones de ingeniería (Darby y Nikolaou, 2012). Actualmente, existen diversos métodos de sintonización de controladores que han sido clasificados como analíticos, estocásticos, respuesta en frecuencia entre otros (Aström y Hägglund, 1995).

Las estructuras de control PID y sus variantes pueden ser entendidas como conceptos de diseño, cuando se les analiza desde el punto de vista de la optimalidad de Pareto. Un concepto de diseño es una idea que ha evolucionado hasta el punto en que existe un modelo paramétrico, que representa el desempeño de la familia de alternativas de diseño que pertenecen a la definición de ese concepto. Por lo tanto, cada concepto de diseño es único, tiene su propio modelo paramétrico que define el espacio que ocupa (Mattson y Messac, 2005).

La optimalidad de Pareto refiere a la existencia de un frente de Pareto, cuando dos o mas objetivos de diseño se contraponen. Un frente de Pareto, es un conjunto de soluciones Pareto-óptimas, no dominadas en la región factible (Reynoso-Meza, 2014). Esto es, no existe una solución mejor que otra en todos los objetivos de diseño, sino un intercambio de prestaciones entre los objetivos en conflicto (ver Figura 1).

La idea de comparar conceptos de diseño desde el punto de vista de la optimalidad de Pareto tiene la finalidad de hacer una comparación integral (y no puntual) de la superficie de prestaciones de los conceptos involucrados. En la Figura 2, se muestran dos conceptos de diseño en un frente de Pareto bidimensional obtenidos mediante optimización multiobjetivo. Se observa el comportamiento global de cada concepto de diseño y su semejanza entre cada uno de ellos. Dicho análisis global de prestaciones, suele ser denominado como una comparación de conceptos de diseño. Esta idea fue empleada con éxito en

sistemas multivariables para el problema de emparejamiento de entradas y salidas (Huicapi et al., 2019) y la comparación de diferentes estructuras de control (Reynoso-Meza et al., 2012).

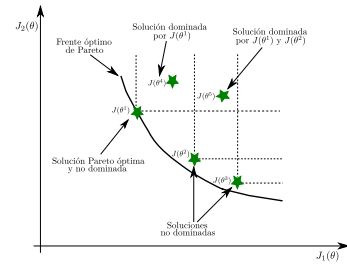


Figura 1: Definición de optimalidad de Pareto y dominancia.

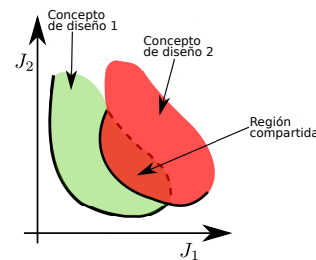


Figura 2: Comparativo global de dos conceptos de diseño en un frente de Pareto bidimensional. Concepto de diseño 1 (verde), concepto de diseño 2 (rojo).

El sistema de estudio que se aborda en este trabajo es el biorreactor de Cholette propuesto por (Chidambaram y Reddy, 1996). Los biorreactores han tenido mucho interés entre la comunidad científica de control automático y biotecnológica ((Carlos-Hernández et al., 2014), (Mora y Amaya, 2017), (Gómez et al., 2015), (Hernández y Herrera Fernandez, 2012)).

Específicamente, el biorreactor de Cholette es un sistema con un comportamiento no lineal, en algunos casos presenta multiplicidad de estados estacionarios con comportamiento inestable y tiene diferentes condiciones de operación. Las condiciones de operación que en este trabajo se abordan son dos. La primera condición de operación (C01) requiere únicamente la concentración de sustrato y la concentración de salida. Mientras que la segunda condición de operación (C02) requiere únicamente de la concentración de sustrato.

Debido a las características no lineales de este biorreactor, multiplicidad de estados estacionarios y condiciones de operación ha sido ampliamente estudiado por la comunidad de control automático. A este sistema se le han aplicado diferentes conceptos de diseño PI, PwI, I-PD, PID, PIDn, entre otros, sintonizados mediante diferentes técnicas. El mayor número de estas técnicas de sintonización han sido la de síntesis directa ((Shariati et al., 2014), (Sree y Chidambaram, 2003b), (Jhunjhunwala y Chidambaram, 2001)) y optimización multiobjetivo ((Rajinikanth y Latha, 2012a), (Carrillo-Ahumada et al., 2014), (Reynoso-Meza et al., 2016)).

El análisis y la comparación de conceptos de diseño para el biorreactor de Cholette han sido abordados por (Carrillo-Ahumada et al., 2011), (Carrillo-Ahumada et al., 2015), (Indranil y Saptarshi, 2015), (Naranjani et al., 2015), (Chen et al.,

2014). Entre los últimos trabajos de investigación, la comparación entre estructuras de diferentes 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. Sin embargo, un análisis integral puede ser llevado a cabo, donde el intercambio de prestaciones entre estructuras puede ser analizado de forma global (Figura 2) al comparar sus frentes de Pareto.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es establecer una metodología que proporcione información acerca del comportamiento de un sistema no lineal al controlarlo con diferentes conceptos de diseño. Para ello se utilizarán sus respectivos frentes de Pareto, obtenidos a partir de un proceso de sintonización mediante un algoritmo evolutivo multiobjetivo (MOEA, por sus siglas en inglés).

En el presente análisis se consideraron dos condiciones de operación distintas pero en un mismo estado estacionario. Las ventajas de llevar a cabo una comparación de conceptos de diseño es que se caracterizan varias alternativas de diseño al mismo tiempo; se analiza de forma cualitativa el intercambio de prestaciones al identificar las fortalezas y debilidades de cada concepto de diseño. Lo anterior permite seleccionar la estructura de controlador y sintonía que mejor se adaptan a las preferencias del diseñador ante cambios en los parámetros del modelo.

Aunque se utilizó como ejemplo el biorreactor de Cholette, la metodología propuesta puede ser aplicada a otros problemas de ingeniería de control, en los cuales es importante determinar qué/cuál concepto de diseño representa mejor las necesidades del ingeniero control o diseñador. Además, permite realizar la comparación entre diferentes conceptos de diseño y obtener así una mejor comprensión conceptual del problema en cuestión, para finalmente determinar así el concepto de diseño es más apropiado.

La estructura de este trabajo de investigación es la siguiente: en la Sección 2 se describe al biorreactor de Cholette y se muestra una revisión bibliográfica de los conceptos de diseño utilizados para este sistema de estudio. En la Sección 3 se presenta la metodología utilizada para la sintonización y comparación de conceptos de diseño. Los resultados de la comparación de conceptos de diseño se muestran para el caso 1 (comparativo entre los conceptos de diseño PI vs. PwI) y para el caso 2 (comparativo entre los conceptos de diseño PID vs. PIDn) se presentan en la Sección 4. Finalmente, se presenta la conclusión de este trabajo de investigación.

2. Caso de estudio: Biorreactor de Cholette

2.1. Descripción general del sistema de estudio

El biorreactor de Cholette es un reactor de tanque agitado continuo (CSTR, por sus siglas en inglés) con mezclado no ideal y con un comportamiento dinámico no lineal (Figura 3).

Este biorreactor 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. Su comportamiento dinámico es descrito por las siguientes ecuaciones:

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

$$c_e = nc + (1 - n)c_f \quad (2)$$

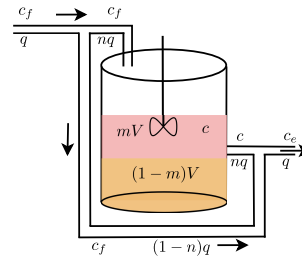


Figura 3: Biorreactor de Cholette.

donde (1) representa el balance de masa para la concentración de sustrato (c) en el biorreactor 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 (2), representa la concentración de sustrato en la salida del biorreactor. El significado de los parámetros de las ecuaciones se describen en el Apéndice A. Este biorreactor puede tener dos condiciones de operación. La primera (C01), utiliza (1) y (2) y la segunda (C02), utiliza únicamente (1). Considerando la naturaleza no lineal de (1) y (2) pueden ser generalizadas como:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, w, u) \quad (3)$$

$$y = g(x, w, u) \quad (4)$$

Por lo tanto, los parámetros de las condiciones de operación son descritos de la siguiente forma:

- Condición de operación 1 (C01): $x_s = c$, $w_s = q$, $u_s = c_f$, $y_s = c_e$.
- Condición de operación 2 (C02): $x_s = c$, $w_s = q$, $u_s = c_f$, $y_s = c$.

Donde x es el estado del sistema, w es la señal exógena, u es la señal de control, y es la salida medida y s indica el estado estacionario.

Se considera que todos los parámetros del modelo y las propiedades físico-químicas son constantes y que la reacción se produce en el CSTR con una mezcla no ideal operado bajo condiciones isotérmicas (Ibarra-Junquera y Rosu, 2007). La utilidad industrial de este biorreactor se encuentra en reacciones catalíticas. Debido a las características mencionadas anteriormente, este sistema ha sido controlado mediante diferentes conceptos de diseño.

2.2. Conceptos de diseño utilizados en el sistema de estudio

Las características propias del comportamiento dinámico, multiplicidad de estados estacionarios ya sean estables e inestables y las diferentes condiciones de operación (C01 y C02) han generado gran interés por la comunidad científica de ingeniería química y en especial por la de control automático. Por lo tanto, se han aplicado diferentes conceptos de diseño derivados del control PID sintonizados por diversas metodologías para múltiples modelos lineales que describen a este sistema (Tabla 1).

Con respecto a la Tabla 1, se ha tenido mayor interés en estudiar al sistema en estados estacionarios inestables que estables. La mayoría de los estudios, han abordado al sistema en la C02 debido a que en algunos casos es más práctico implementar el control en la ecuación diferencial que en una salida descrita por una ecuación algebraica. El orden de aplicación de los conceptos de diseño es $PwI > PID > PIDn > PI$ principalmente. Además, se han utilizado en menor medida las estructuras con dos grados de libertad como I-PD, PwI-Dy y poco exploradas las estructuras I y PSC.

Específicamente, en este trabajo de investigación se han elegido los cuatro conceptos de diseño PI, PwI, PID y PIDn por ser los que, a la vista de la revisión bibliográfica, se han utilizan con mayor frecuencia en el control del biorreactor de Cholette, tal y como se muestra en la Tabla 1. Los mismos se describen a continuación:

■ Controlador PI:

$$U(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)E(s) \quad (5)$$

■ Controlador PwI:

$$U(s) = \left(k_p w + \frac{k_i}{s}\right)R(s) - \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)Y(s) \quad (6)$$

■ Controlador PID:

$$U(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s\right)E(s) \quad (7)$$

■ Controlador PIDn:

$$U(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{\frac{k_d s}{N} + 1}\right)E(s) \quad (8)$$

donde, los parámetros de los conceptos de diseño son k_p , k_i y k_d representan las ganancias proporcional, integral y derivativa.

Estos conceptos de diseño pueden ser sintonizados por diferentes métodos ya sean analíticos y numéricos como el de síntesis directa, optimización mono y multiobjetivo, respuesta en frecuencia, entre otros. Estos métodos tienen como objetivo principal la estabilidad del sistema de control, desempeño y robustez en diferentes medidas. También existen diferentes indicadores numéricos del desempeño de un sistema de control. Entre los más comunes son los que implican integrales en el dominio del tiempo. En este trabajo de investigación, se utilizan los índices de desempeño numéricos ITSE y TVU (por sus siglas en inglés).

■ Integral del cuadrado del error ponderado por el tiempo (ITSE):

$$ITSE = \int_0^N t e^2(t) dt \quad (9)$$

■ Integral de la variación total de la señal de control (TVU):

$$TVU = \sum_{k=1}^N |u(k) - u(k-1)| \quad (10)$$

Donde N es el número total de muestras, k es la muestra actual, t es el tiempo y e es el error entre el punto de consigna y la salida medida. (9) y (10) evalúan numéricamente al sistema no lineal ya sea ante cambios regulatorios ($ITSE_{regulatorio}$, $TVU_{regulatorio}$) o servo ($ITSE_{servo}$, TVU_{servo}). La metodología que se plantea en la siguiente sección puede ser utilizada con diferentes conceptos de diseño e índices de desempeño.

3. Metodología

La metodología propuesta en el presente trabajo de investigación esta constituida de las siguientes etapas:

1. Establecer una región de estabilidad del espacio de búsqueda.

Un sistema es estable, si y solo si, su respuesta en el tiempo permanece acotada, para una entrada acotada (Smith et al., 1991). Dos condiciones son necesarias para mantener la estabilidad del sistema. La primera condición, es que la parte real de los valores propios de la matriz de estados del sistema debe ser menor que cero ya sea que éstos sean reales ($\lambda = \sigma$) o complejos ($\lambda = \sigma + wi$) (11 y 12). La segunda consiste en minimizar la parte real máxima de dichos valores propios de la matriz del sistema considerando la abscisa espectral (13) y de ésta manera minimizar el tiempo de estabilización. Por lo tanto, y de acuerdo con (García-Alvarado et al., 2005),

$$Re(\lambda_i) < 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\lambda_i = \sigma + wi, \quad \text{donde, } \sigma < 0 \quad (12)$$

$$r_{min} = \text{Max}(\text{abs}[Re(\lambda_i)]) \quad (13)$$

Con las condiciones y restricciones expresadas anteriormente (11-13) se asegura que el sistema controlado será estable en función de los parámetros del concepto de diseño a sintonizar. El proceso de búsqueda de la región de estabilidad, empieza con un intervalo inicial muy amplio para cada uno de los parámetros de control ($\beta_{inferior} \leq \theta_1 \leq \beta_{superior}$, $\beta_{inferior} \leq \theta_2 \leq \beta_{superior}$, $\beta_{inferior} \leq \theta_3 \leq \beta_{superior}$, ..., $\beta_{inferior} \leq \theta_n \leq \beta_{superior}$) del concepto de diseño a sintonizar. Estos intervalos iniciales de búsqueda, son los datos de entrada para el algoritmo 1 que se encarga de buscar la región (zona) de estabilidad de acuerdo al concepto de diseño que se desea aplicar. Al finalizar la ejecución del algoritmo, éste proporciona un conjunto de soluciones estables 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).

Tabla 1: Revisión de modelos y conceptos de diseño aplicados al biorreactor de Cholette.

Modelo	Estado		Parámetros	Conceptos de diseño								Referencia		
	Estable	Inestable		I	I-PD	PI	PwI	PID	PIDn	PwID	PwI-Dy		PSC	
1)	$G(s) = \frac{0.2541s+0.2734}{0.9364s+1}$	✓	$c_s = 0.05867, c_{fs} = 7.024, c_e = 1.8$	✓									Chidambaram y Reddy (1996)	
2)	$G(s) = \frac{1.12106}{33.635s-1}e^{-10s}$	✓	$c_s = 1.0439, c_{fs} = 3,288$					✓					Huang y Chen (1999)	
								✓					Jhunjhunwala y Chidambaram (2001)	
								✓					Reynoso-Meza et al. (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)	
4)	$G(s) = \frac{3.3226}{99.69s-1}e^{-20s}$	✓	$c_s = 1,3065, c_{fs} = 3,288$	✓									Padma y Chidambaram (2002)	
														Rajinikanth y Latha (2012a)
												✓		Padma y Chidambaram (2005)
														Rajinikanth y Latha (2012b)
5)	$G(s) = \frac{-0.1727(1-4.473s)}{3.1s-1}$	✓	$c_s = 0,2383, c_{fs} = 6,484, c_{es} = 1,8$					✓					SivaramaKrishnan y Tangirla. (2008)	
								✓					Sree y Chidambaram (2003a)	
								✓					Carrillo-Ahumada et al. (2011)	
6)	$G(s) = \frac{3.433}{103.1s-1}e^{-20s}$	✓	$c_s = 1,316, c_{fs} = 3,288$					✓					Ibarra-Junquera y Rosu (2007)	
								✓					Márquez-Rubio y del Muro-Cuéllar (2010)	
								✓					Normey-Rico y Camacho (2009)	
								✓					Seshagiri et al. (2007)	
											✓	Ajmeri y Ali (2015)		

P: proporcional, I: integral, D: derivativa, w: ponderación, n: filtro, y: salida, PSC: Estructura de control paralela. Modelos 1, 3 y 5 corresponden a C01. Modelos 2, 4 y 6 corresponden a C02.

```

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

```

Algoritmo 1: Algoritmo para obtener una región de estabilidad en un sistema, en bucle cerrado.

- Planteamiento del problema y proceso de optimización. El proceso de optimización, consiste en la búsqueda de soluciones óptimas entre los diferentes objetivos involucrados (9)-(10). Para ello, la zona de estabilidad de los parámetros de los conceptos de diseño obtenida en la etapa anterior serán los datos de entrada (población inicial) para el algoritmo evolutivo de optimización multiobjetivo, sp-MODE propuesto por (Reynoso-Meza, 2014). El planteamiento del problema de optimización (14) es el mismo para cualquier concepto de diseño, variando solamente en los respectivos parámetros de cada estructura.

$$\min J(\theta) = [ITS E_{regulatorio}(\theta), ITS E_{servo}(\theta), TVU_{regulatorio}(\theta), TVU_{servo}(\theta)] \quad (14)$$

Para resolver el problema de optimización es importante definir un espacio de búsqueda (el cual fue definido en la etapa anterior) 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:

$$-\infty \leq ITS E_{regulatorio}, ITS E_{servo}, TVU_{regulatorio}, TVU_{servo} \leq \infty \quad (15)$$

Con lo cual, no se tiene restricción en los valores numéricos de los índices. De manera particular, el espacio de búsqueda para cada concepto de diseño, puede describirse como sigue:

- Para el concepto de diseño PI ($\theta_{PI} = [k_p, k_i]$):

$$\underline{k_p} \leq k_p \leq \overline{k_p} \quad \underline{k_i} \leq k_i \leq \overline{k_i} \quad (16)$$

- Para el concepto de diseño PwI ($\theta_{PwI} = [k_p, k_i, w]$):

$$\underline{k_p} \leq k_p \leq \overline{k_p} \quad \underline{k_i} \leq k_i \leq \overline{k_i} \quad \underline{w} \leq w \leq \overline{w} \quad (17)$$

- Para el concepto de diseño PID ($\theta_{PID} = [k_p, k_i, k_d]$):

$$\underline{k_p} \leq k_p \leq \overline{k_p} \quad \underline{k_i} \leq k_i \leq \overline{k_i} \quad \underline{k_d} \leq k_d \leq \overline{k_d} \quad (18)$$

- Para el concepto de diseño PIDn ($\theta_{PIDn} = [k_p, k_i, k_d, n]$):

$$\underline{k_p} \leq k_p \leq \overline{k_p} \quad \underline{k_i} \leq k_i \leq \overline{k_i} \quad \underline{k_d} \leq k_d \leq \overline{k_d} \quad \underline{n} \leq n \leq \overline{n} \quad (19)$$

- Análisis de los frentes y conjuntos 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 en 1, 2, 3 o más dimensiones permitiendo así observar la interrelación de los datos. Por lo tanto, le permite al diseñador realizar un análisis 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. Considerando también las medias aritméticas se puede tener una perspectiva global de cada concepto de diseño.

4. Evaluación de conceptos de diseño en dominio del tiempo. Después de analizar y comparar visualmente el conjunto y frente de Pareto es necesario llevar a cabo una evaluación (análisis cuantitativo) mediante la simulación en el dominio del tiempo de cada una de las soluciones. Para este estudio se utiliza el método Runge Kutta de 4º orden con un paso constante de 0.1. La evaluación numérica se lleva a cabo para la salida del sistema y para la señal de control utilizando Matlab® 2014a. Además, se aplica tanto para el escenario regulatorio (variación del parámetro q) como para el escenario servo (variación del punto de consigna c ó c_e).

Las etapas presentadas anteriormente que describen la metodología pueden ser visualizadas en la Figura 4.

4. Resultados

En esta sección se presentan dos casos de comparación de conceptos de diseño: PI vs PwI; y PID vs PIDn para el biorreactor de Cholette. Los cuatro conceptos de diseño fueron aplicados al estado estacionario y condición de operación mostrado en la Tabla 2. Evaluando al sistema en bucle cerrado en los escenarios regulatorio y servo mediante los índices ITSE y TVU en el dominio del tiempo.

Como se muestra en la Tabla 2, se utiliza el mismo estado estacionario inestable para los cuatro conceptos de diseño, pero se aplican dos conceptos de diseño para cada condición de operación.

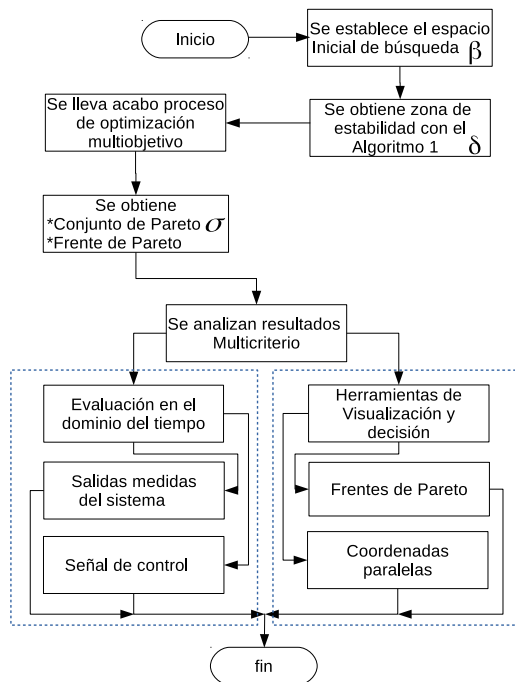


Figura 4: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Preliminarmente, al comparativo global entre conceptos de diseño, se realiza la sintonización de los conceptos de diseño PI,

PwI, PID, y PIDn y son comparados con propuestas obtenidas de bibliografía:

1. PI (5): $k_p = 0,6554$, $k_i = 0,0064$ (Shariati et al., 2014).
2. PwI (6): $k_p = 1,24$, $k_i = 0,0127$ $w = 0,1517$ (Sree y Chidambaram, 2003b).
3. PID (7): $k_p = 3,151$, $k_i = 0,0585$, $k_d = 18,4649$ (Jhunjhunwala y Chidambaram, 2001).
4. PIDn (8): $k_p = 1,4715$, $k_i = 0,0147$, $k_d = 6,392$, $n = 10$ (Rajinikanth y Latha, 2012a).

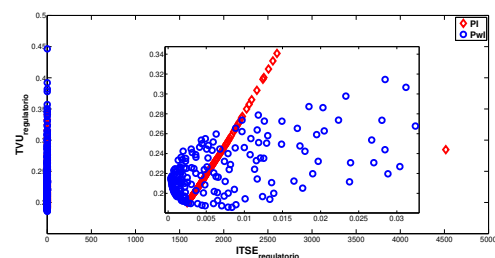
La sintonización individual de cada concepto de diseño, específicamente la región de estabilidad y el comparativo de propuestas bibliográficas utilizando coordenadas paralelas son mostrados en el Apéndice B.

La sintonización global de conceptos de diseño utilizando la presente metodología muestran un intervalo de estabilidad y desempeño más amplio que la solución particular propuesta en bibliografía. Cabe mencionar que las propuestas bibliográficas son obtenidas por diferentes metodologías de sintonización, cubriendo de manera adecuada el desempeño y robustez según el criterio utilizado por cada autor.

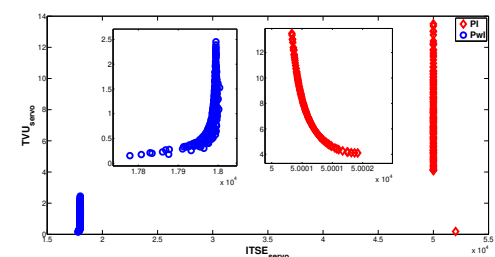
La presente propuesta es por medio de optimización multi-objetivo con el modelo no lineal en el dominio del tiempo.

4.1. Caso 1: Comparativo entre los conceptos de diseño PI vs PwI

La sintonización de los conceptos de diseño PI y PwI mediante la metodología presentada generan frentes de Pareto que se muestran en la Figura 5. Los frentes de Pareto aproximados son comparados entre sí para los índices ITSE y TVU en el escenario regulatorio y servo.



(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 5: Comparación de frentes de Pareto PI y PwI.

En la Figura 5a, se puede visualizar que los conceptos de diseño PI y PwI comparten cierta región ($0 \leq ITSE_{regulatorio} \leq$

Tabla 2: Conceptos de diseño aplicados a diferentes condiciones de operación y estado estacionario.

Estado estacionario /Condición de operación	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	Índices (regulatorio, servo)	Conceptos de diseño
inestable / C01 Abscisa bucle abierto =0.0102	3.288	1.303	1.8	ITSE TVU	PI PwI
inestable / C02 Abscisa bucle abierto =0.0102	3.288	1.303	no aplica	ITSE TVU	PID PIDn

0,015) y ($0 \leq TVU_{regulatorio} \leq 0,28$). Además, existe mayor cantidad de soluciones para el concepto de diseño PwI y se encuentran más dispersas en el espacio de solución en comparación con las soluciones de concepto del diseño PI el cual presenta una distribución de las soluciones más estrecha.

En la Figura 5b, se muestran los frentes de Pareto en el escenario servo para los conceptos de diseño PI y PwI. Las soluciones de ambos conceptos de diseño se encuentran completamente separadas entre si. El concepto de diseño PwI se encuentra más cercano al origen aproximadamente en el intervalo $1,78 \times 10^4 \leq ITSE_{servo} \leq 1,8 \times 10^4$, mientras que el concepto de diseño PI se encuentra aproximadamente en el intervalo $5,001 \times 10^4 \leq ITSE_{servo} \leq 5,0002 \times 10^4$ (este valor se debe a la restricción en los parámetros k_p y k_i). Los dos conceptos de diseño PI y PwI comparten una región en común para el escenario regulatorio (Figura 5a). En cambio, para el escenario servo se observa que los dos frentes de Pareto se encuentran separados completamente el uno del otro (Figura 5b). Por lo tanto, el más cercano al origen es el concepto de diseño PwI y éste podría elegirse.

Mediante la Figura 5 se tiene una visualización aproximada de las prestaciones de cada concepto de diseño. Por lo tanto, para realizar un análisis cuantitativo se utiliza en este trabajo de investigación la media aritmética¹ de cada uno de los índices en cada concepto de diseño: PI ($\bar{\mu}_{(PI)}$) y PwI ($\bar{\mu}_{(PwI)}$).

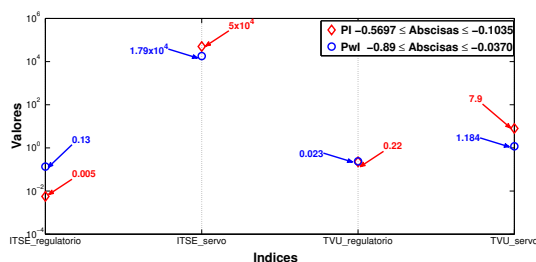


Figura 6: Comparación de medias para los conceptos de diseño PI (color rojo) y PwI (color azul)

Al comparar las medias aritméticas se puede establecer de manera global la tendencia de cada índice de desempeño, además de tener una apreciación global de cada concepto de diseño, no importando el número de soluciones obtenidas. En la Figura 6 se puede observar el valor de cada índice y el inter-

valo de la abscisa espectral para cada concepto de diseño. 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. Los valores numéricos de la media de cada índice y concepto de diseño se encuentran en la Tabla 3.

De acuerdo al análisis de relación entre los diferentes conceptos de diseño (Figura 5) y las comparaciones por medio de las medias aritméticas (Figura 6 y Tabla 3) se puede concluir que el concepto de diseño PwI es el más apropiado que el concepto de diseño PI para este estado estacionario.

Tabla 3: Comparación de conceptos de diseño PI y PwI mediante medias aritméticas.

Comparación de conceptos de diseño			
Índice de desempeño	$\bar{\mu}_{(PI)}$	$\bar{\mu}_{(PwI)}$	Comportamiento
$ITSE_{regulatorio}$	0,005	0,13	$\bar{\mu}_{(PI)} < \bar{\mu}_{(PwI)}$
$ITSE_{servo}$	$5,4 \times 10^4$	$1,79 \times 10^4$	$\bar{\mu}_{(PI)} > \bar{\mu}_{(PwI)}$
$TVU_{regulatorio}$	0,22	0,023	$\bar{\mu}_{(PI)} > \bar{\mu}_{(PwI)}$
TVU_{servo}	7,9	1,184	$\bar{\mu}_{(PI)} > \bar{\mu}_{(PwI)}$

$\bar{\mu}_{(PI)}$: Media aritmética para el concepto diseño PI.

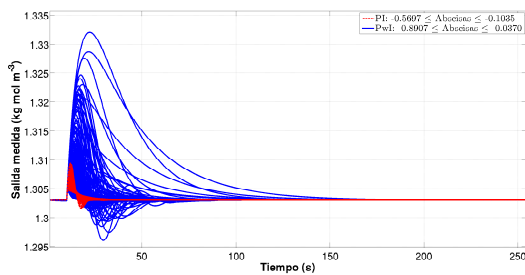
$\bar{\mu}_{(PwI)}$: Media aritmética para el concepto diseño PwI.

Para complementar el análisis de la comparación de conceptos de diseño, se realizan simulaciones en dominio del tiempo del sistema en bucle cerrado en los escenarios regulatorio (Figura 7) y servo (Figura 8). El escenario regulatorio consiste en un cambio en el parámetro q , cuando $t < 10$ entonces $q = 3,33 \times 10^{-5}$, cuando $t > 10$ entonces $q = 3,66 \times 10^{-5}$ manteniendo constante $c = 1,303$. El escenario servo consiste en un cambio en el parámetro c cuando $t < 10$ entonces $c = 1,303$, cuando $t > 10$ entonces $c = 1,403$ manteniendo constante $q = 3,33 \times 10^{-5}$.

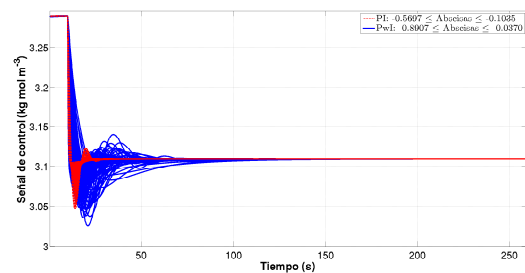
En la Figura 7b, muestra la señal de control para los dos conceptos de diseño. Para el concepto de diseño PI se observa que la señal de control es menos sensible al cambio regulatorio en comparación del concepto de diseño PwI. Por lo tanto,

¹ $\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$. Donde: $\bar{\mu}$ es la media aritmética, x_i son las observaciones y n es el número total de datos.

proporciona robustez al sistema de control.

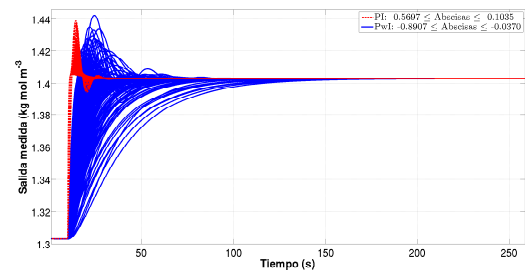


(a) Señal de salida. Escenario regulatorio para los conceptos de diseño: PI (color rojo) y PwI (color azul).

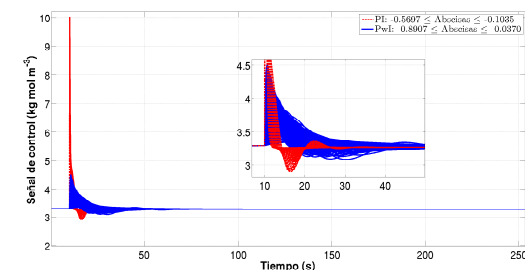


(b) Señal de control. Escenario regulatorio para el concepto de diseño: PI (color rojo) y PwI (color azul).

Figura 7: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PI y PwI (regulatorio).



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



(b) Señal de control. Escenario servo para el concepto de diseño: PI (color rojo) y PwI (color azul).

Figura 8: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PI y PwI (servo).

La Figura 7a, muestra la señal de salida en el escenario regulatorio para cada uno de los conceptos de diseño. La Fi-

gura 7a, muestra la señal de salida en el escenario regulatorio para cada uno de los conceptos de diseño. El concepto de diseño PI ($-0,5697 \leq \text{Abciscas} \leq -0,1035$) tiene un menor sobrepaso además de un tiempo de establecimiento menor que el concepto de diseño PwI. El concepto de diseño PwI ($-0,8907 \leq \text{Abciscas} \leq -0,0370$) presenta algunas soluciones que tienen un sobrepaso muy pronunciado y un tiempo de establecimiento muy grande a comparación del concepto de diseño PI.

En la Figura 8a, se muestra la salida en el escenario servo para los conceptos de diseño PI y PwI. Para el concepto de diseño PI, se observa un sobrepaso similar a algunas soluciones del concepto de diseño PwI, también existen algunas soluciones que presentan un bajopaso con un tiempo de establecimiento menor, aproximadamente entre 30 y 40 segundos. Para el concepto de diseño PwI existen un conjunto de soluciones con un sobrepaso menor e igual al concepto de diseño PI y algunas otras no tienen sobrepaso, pero su tiempo de establecimiento es mayor (aproximadamente entre 100 y 150 segundos).

La señal de control para el concepto de diseño PI (Figura 8b), es muy sensible al cambio servo en comparación con el concepto de diseño PwI aunque genera soluciones con gran margen de estabilidad.

4.2. Caso 2: Comparativo entre los conceptos de diseño PID vs PIDn

La razón por la que se compara un concepto de diseño PID contra un PIDn, es que debido a la revisión bibliográfica (Tabla 1) son dos estructuras que han sido utilizadas con mayor frecuencia, como se ha mencionado en la introducción. Pero además es interesante ver el impacto de la aplicación de un filtro en la derivada como un parámetro más de ajuste en la respuesta dinámica del sistema.

El comparativo por medio de frentes de Pareto de los conceptos de diseño PID vs PIDn en los escenarios regulatorio (Figura 9a) y servo (Figura 9b) se muestra a continuación.

Analizando el escenario regulatorio (Figura 9a) se tiene lo siguiente: 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 en un intervalo amplio de estabilidad ($-0,912 \leq \text{Abciscas} \leq -0,0144$) a diferencia del concepto de diseño PIDn ($-0,19 \leq \text{Abciscas} \leq -0,013$).

Las soluciones de concepto de diseño PID 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 $TVU_{regulatorio}$, las soluciones del frente de Pareto del PID también se encuentran más cercanas al origen en comparación con las soluciones del frente de Pareto del concepto de diseño 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.

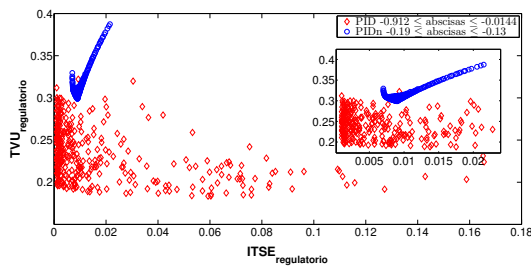
En el escenario servo (Figura 9b), los frentes de Pareto se encuentran completamente separados. Por ejemplo, para el caso del índice $ITSE_{servo}$ los dos frentes de Pareto (PID y PIDn)

su distribución es muy estrecha, pero el PID se encuentra más cercano al origen.

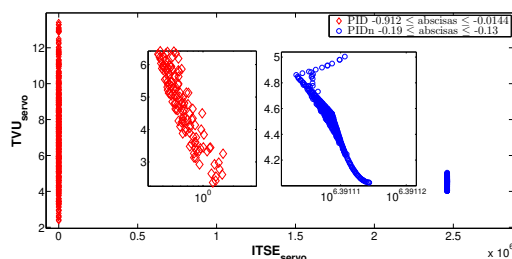
Por lo que se puede decir, que el PID domina al PIDn. Para el índice TVU_{servo} existe una región compartida muy estrecha entre ambos pero con diferente orden de magnitud.

Después de concluir un enfoque visual y descriptivo, se realiza un análisis cuantitativo de los dos índices ITSE y TVU obteniendo su media aritmética (PID ($\bar{\mu}_{(PID)}$) y PIDn ($\bar{\mu}_{(PIDn)}$)). Esto permitirá establecer de manera global la tendencia de cada uno de sus índices y obtener una apreciación de cada concepto de diseño, independientemente del número de soluciones que constituyan a cada uno.

Por ello, en la Figura 10 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. Para los índices de la señal 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.



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



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

Figura 9: Comparación de frentes de Pareto PID y PIDn.

Como se mencionó anteriormente, otro método de comparación entre conceptos de diseño es realizando una simulación numérica en el dominio del tiempo (Figura 11). Es por ello, que en la Figura 11a, 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 sobrepaso similar al concepto de diseño PIDn además existen dos soluciones que tienen un sobrepaso muy pronunciado y un

tiempo de establecimiento mayor, aproximadamente entre 200 y 250 segundos. En cambio para el concepto de diseño PIDn se observa que todas sus soluciones presentan sobrepasamientos menores que el PID y a pesar de que también presentan bajopaso, su tiempo de establecimiento es menor, aproximadamente entre 30 y 40 segundos.

Continuando con el análisis en escenario regulatorio, en la Figura 11b, se muestra el comportamiento de la señal de control para el concepto de diseño PID y para el concepto de diseño PIDn. En principio, se observa que el control para el PID es ligeramente suave, no muestra cambios muy bruscos ante un cambio regulatorio, tiene un bajopaso 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, con lo que se genera diferentes regiones de robustez.

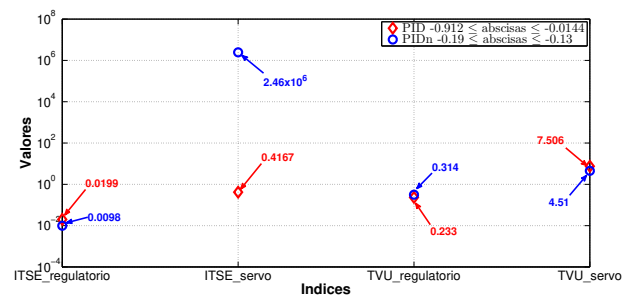


Figura 10: Comparación de medias para los conceptos de diseño PID (color rojo) y PIDn (color azul).

Tabla 4: Comparación de conceptos de diseño PID y PIDn, a partir de la media aritmética.

Comparación de conceptos de diseño			
Índice de desempeño	$\bar{\mu}_{(PID)}$	$\bar{\mu}_{(PIDn)}$	Comportamiento
$ITSE_{regulatorio}$	0,019	0,0098	$\bar{\mu}_{(PID)} > \bar{\mu}_{(PIDn)}$
$ITSE_{servo}$	0,4167	$2,46 \times 10^6$	$\bar{\mu}_{(PID)} < \bar{\mu}_{(PIDn)}$
$TVU_{regulatorio}$	0,233	0,314	$\bar{\mu}_{(PID)} < \bar{\mu}_{(PIDn)}$
TVU_{servo}	7,506	4,51	$\bar{\mu}_{(PID)} > \bar{\mu}_{(PIDn)}$

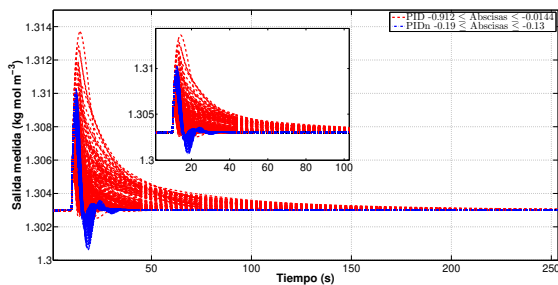
$\bar{\mu}_{(PID)}$: Media aritmética para el concepto diseño PID.

$\bar{\mu}_{(PIDn)}$: Media aritmética para el concepto diseño PIDn.

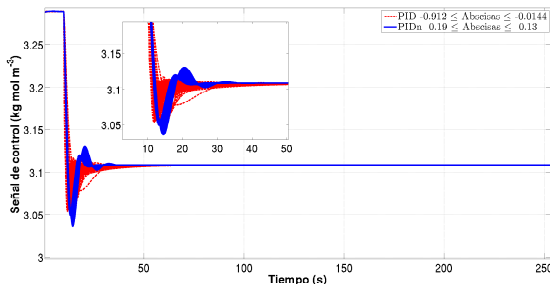
Por lo tanto, de manera general se puede decir que para el escenario regulatorio los dos conceptos de diseño (PID y PIDn) tienen un comportamiento hasta cierto punto similar, pero de acuerdo a lo observado en la Figura 9a es posible que sea más adecuado elegir algunas soluciones del PID, debido a que se encuentra más cercano al origen.

Para el escenario servo, también se lleva a cabo un análisis en el dominio del tiempo, (Figura 12). Por lo tanto, en la Figura 12a 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 sobrepaso menor que el concepto de diseño PIDn. Con respecto al tiempo de establecimiento, se observa que muchas de las soluciones tienen un tiempo de establecimiento 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; no obstante a estos cambios, se logra controlar el sistema aproximadamente en un tiempo de 40 y 50 segundos.



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



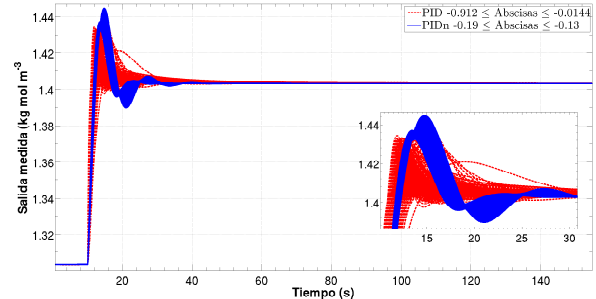
(b) Señal de control. Escenario regulatorio para el concepto de diseño: PID (color rojo) y PIDn (color azul).

Figura 11: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño: PID y PIDn (regulatorio).

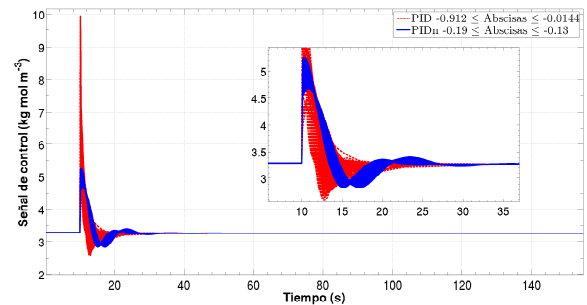
En la Figura 12b, se puede apreciar que para el concepto de diseño PID, el control es muy sensible al cambio servo (tiene un sobrepasamiento muy grande en comparación con la señal de control PIDn), pero aún así, se observa que su tiempo de estabilización no es muy grande, aproximadamente se encuentra 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 bucle cerrado, evidentemente cada uno con sus propias ventajas y desventajas explicadas anteriormente, ya que los sobrepasamientos y

bajopasamientos de cada uno con sus tiempos de establecimiento respectivos se compensan. Pero de acuerdo a la comparación de los frentes de Pareto de la Figura 9, el concepto de diseño PID podría elegirse debido a que sus soluciones se encuentran más cercanas al origen. Por lo tanto, sus soluciones podrían presentar un mejor desempeño.



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



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

Figura 12: Comparación mediante simulación en el dominio del tiempo para los conceptos de diseño PID y PIDn (servo).

5. Conclusiones

En la primera fase de comparación de los conceptos de diseño con algunos de bibliografía se puede concluir que las soluciones obtenidas por optimización superaron a los controles tomados de referencia. Esto debido a que fueron sintonizados con el modelo no lineal en dominio del tiempo. Para la condición de operación C01, el concepto de diseño PwI domina al concepto de diseño PI en los índices $ITSE_{servo}$, $TVU_{regulatorio}$, y TVU_{servo} . Para la condición de operación C02, se puede concluir que el concepto de diseño PID domina al concepto de diseño PIDn en los índices $ITSE_{servo}$ y $TVU_{regulatorio}$. En cambio, el concepto de diseño PIDn domina al PID en los índices $ITSE_{regulatorio}$ y TVU_{servo} . Por lo tanto, con esta metodología se puede tener una mejor comprensión de una solución conceptual y de un determinado concepto de diseño. Como trabajo futuro, se aplicará esta metodología para un mayor número de conceptos de diseño.

Agradecimientos

El primer autor agradece a la Universidad del Papaloapan y al L.C.P. Rubén Jiménez Cervantes Vice-Rector Administrativo, por las facilidades otorgadas para este trabajo.

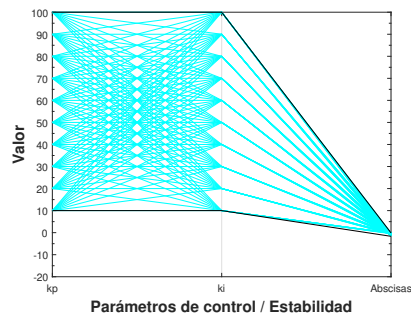
Referencias

- Ajmeri, M., Ali, A., 2015. Two degree of freedom control scheme for unstable processes with small time delay. *ISA Transactions* 56, 308–326.
- Aström, K., Hägglund, T., 2006. *Advanced PID Control*. Vol. 461. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society Research Triangle.
- Aström, K. J., Hägglund, T., 1995. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC.
- Carlos-Hernández, S., Sanchez, E. N., Béteau, J.-F., Jiménez, L. D., 2014. Análisis de un Proceso de Tratamiento de Efluentes para Producción de Metano. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 11 (2), 236 – 246.
- Carrillo-Ahumada, J., Páramo-Calderón, D., Aparicio-Saguilán, A., Rodríguez-Jimenes, G., 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.
- Carrillo-Ahumada, J., Reynoso-Meza, G., García-Nieto, S., Sanchis, J., García-Alvarado, M., 2015. Sintonización de controladores Pareto-óptimo robustos para sistemas multivariables. 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., 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., 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.
- Chidambaram, M., Reddy, G., 1996. Nonlinear control of systems with input and output multiplicities. *Computers and Chemical Engineering* 20 (3), 295 – 299.
- Darby, M. L., Nikolaou, M., 2012. MPC: Current practice and challenges. *Control Engineering Practice* 20 (4), 328 – 342.
- García-Alvarado, M., Ruiz-López, I., 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.
- Gómez, L., Botero, H., Alvarez, H., di Sciascio, F., 2015. Análisis de la Controlabilidad de Estado de Sistemas Irreversibles Mediante teoría de conjuntos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 12 (2), 145 – 153.
- Hernández, F., Herrera Fernandez, F., 03 2012. Identificación Inteligente de un Proceso Fermentativo Usando el Algoritmo GMDH Modificado. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 9, 313.
- Huang, H., Chen, C., 1999. Autotuning of PID Controllers for Second Order Unstable Process Having Dead Time. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 32 (4), 486–497.
- Huicapi, V., Blasco, X., Herrero, J. M., Reynoso-Meza, G., 2019. A loop pairing method for multivariable control systems under a multi-objective optimization approach. *IEEE Access* 7, 81994–82014.
- Ibarra-Junquera, V., Rosu, H., 2007. PI-controlled bioreactor as a generalized Liénard system. *Computers and Chemical Engineering* 31 (3), 136–141.
- Indranil, P., Saptarshi, D., 2015. Fractional-order load-frequency control of interconnected power systems using chaotic multi-objective optimization. *Applied Soft Computing* 29, 328 – 344.
- Jhunjhunwala, M. K., Chidambaram, M., 2001. PID Controller tuning for Unstable Systems by Optimization Method. *Chemical Engineering Communications* 185 (1), 91–113.
- Márquez-Rubio, J., del Muro-Cuellar, 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., Messac, A., 2005. Pareto Frontier Based Concept Selection Under Uncertainty, with Visualization. *Optimization and Engineering* 6 (1), 85–115.
- Mora, L. A., Amaya, J. E., 2017. Un nuevo Método de Identificación Basado en la Respuesta Escalón en Lazo Abierto de Sistemas Sobre-amortiguados. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 14 (1), 31–43.
- Naranjani, Y., Sardahi, Y., Chen, 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., 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*. IFAC Proceedings Volumes 57.
- Padma, S., Chidambaram, M., 2002. Identification of Unstable transfer Model with a Zero by Optimization method. *Journal of the Indian Institute of Science* 82 (5 & 6), 219–225.
- Padma, S., Chidambaram, M., 2005. Set Point Weighted PID Controllers For Unstable Systems. *Chemical Engineering Communications* 192 (1), 1–13.
- Rajinikanth, V., Latha, K., 2012a. Controller Parameter Optimization for Non-linear Systems Using Enhanced Bacteria Foraging Algorithm. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing* 2012.
- Rajinikanth, V., 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.
- Reynoso-Meza, G., 2014. Controller tuning by means of evolutionary multiobjective optimization: a holistic multiobjective optimization design procedure. Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de València, <http://hdl.handle.net/10251/38248>.
- Reynoso-Meza, G., Carrillo-Ahumada, J., Boada, 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., Blasco, F. X., 2012. Controller tuning by means of multi-objective optimization algorithms: A global tuning framework. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 21 (2), 445–458.
- Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., 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.
- Samad, T., Feb 2017. A survey on industry impact and challenges thereof [technical activities]. *IEEE Control Systems Magazine* 37 (1), 17–18.
- Sanchez, A., Rotstein, G., Alsop, N., Bromberg, J., Gollain, C., Sorensen, S., Macchietto, S., Jakeman, C., 2002. Improving the development of event-driven control systems in the batch processing industry. A case study. *ISA Transactions* 41 (3), 343 – 363.
- Seshagiri, R., Rao, V., Chidambaram, M., 2007. Simple Analytical Design of Modified Smith Predictor with Improved Performance for Unstable First-Order Plus Time Delay (FOPTD) Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46 (13), 4561–4571.
- Shariati, A., Taghirad, H., 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., Tangirala, 2008. Sliding mode controller for unstable systems. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 22 (1), 41–47.
- Smith, C. A., Corripio, A. B., Basurto, S. D. M., 1991. *Control automático de procesos: teoría y práctica*. No. 968-18-3791-6. Limusa.
- Sree, P., Chidambaram, M., 2003a. Control of unstable bioreactor with dominant unstable zero. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 17 (3), 139–145.
- Sree, P., Chidambaram, M., 2003b. A Simple Method of Tuning PI Controllers for Unstable Systems with a Zero. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 17 (3), 207–212.
- Vilanova, R., Alfaro, V. M., 2011. Control PID robusto: Una visión panorámica. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 8 (3), 141 – 158.
- Yu, W., Wilson, D., Young, B., 2010. Control performance assessment for non-linear systems. *Journal of Process Control* 20 (10), 1235 – 1242.

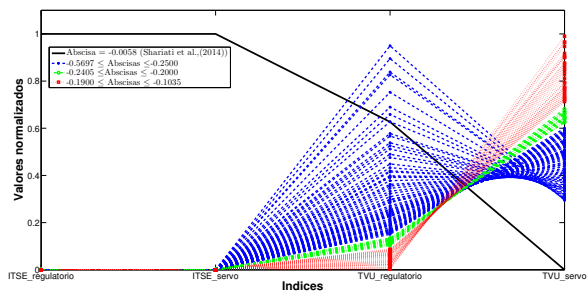
Apéndice A. Nomenclatura

c	Concentración de sustrato (kg mol m^{-3})
c_e	Concentración de salida (kg mol m^{-3})
c_f	Concentración de alimentación de sustrato (kg mol m^{-3})
k_1	Máxima velocidad cinética (s^{-1})
k_2	Parámetro de inhibición (kg mol^{-1})
m	Índice de mezclado (adim)
n	Índice de mezclado (adim)
q	Velocidad de flujo de alimentación ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
V	Volumen (m^3)

Apéndice B. Conceptos de diseño individuales

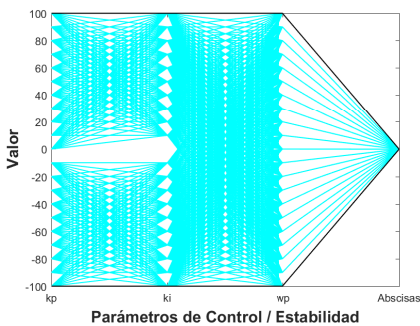


(a) Región de estabilidad para el concepto de diseño PI con el Algoritmo 1.

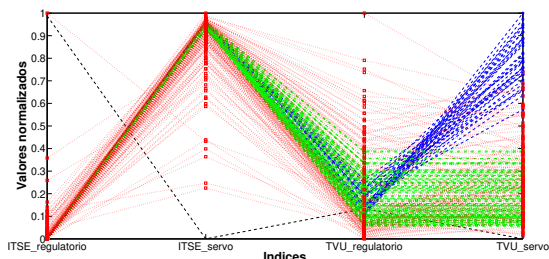


(b) Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PI.

Figura B.13: Concepto de diseño PI.



(a) Zona de estabilidad para el concepto de diseño PwI con el algoritmo 1



(b) Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PwI.

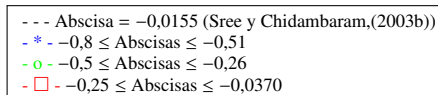
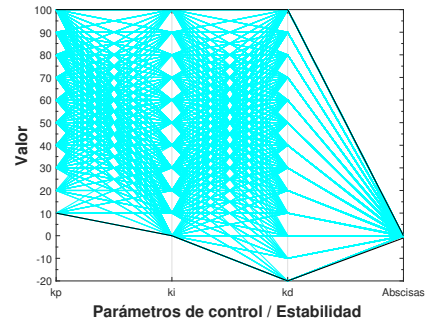
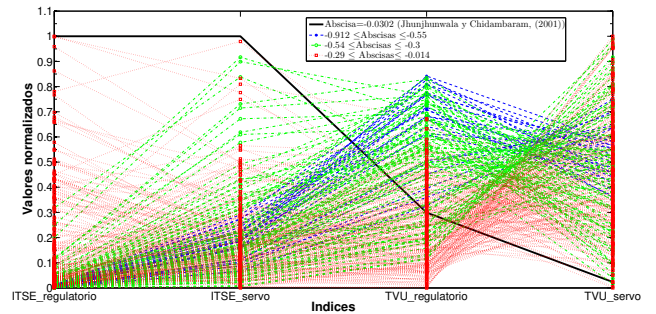


Figura B.14: Concepto de diseño PwI.

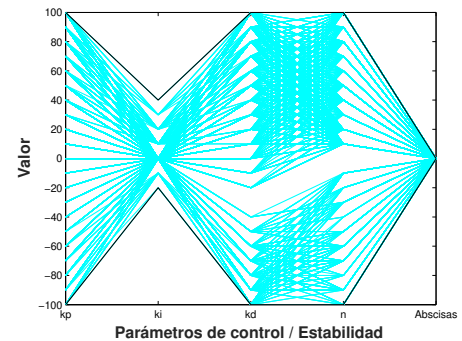


(a) Zona de estabilidad para el concepto de diseño PID con el Algoritmo 1

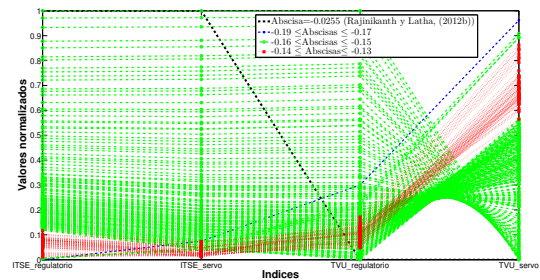


(b) Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PID.

Figura B.15: Concepto de diseño PID.



(a) Zona de estabilidad para el concepto de diseño PIDn con el Algoritmo 1.



(b) Valores normalizados de los índices en coordenadas paralelas para el concepto de diseño PIDn.

Figura B.16: Concepto de diseño PIDn.