



DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL Y COMPARATIVA PARA SISTEMAS MULTIVARIABLES LINEALES ACOPLADOS, DESCOMPONIBLES EN SISTEMAS MIMO DIFUSO VS PID

JULIO ERNESTO GOMÉZ HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES
PAMPLONA

2022



JULIO ERNESTO GOMÉZ HERNÁNDEZ

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE MAGÍSTER EN CONTROLES INDUSTRIALES

Director:

PhD. ALDO PARDO GARCÍA

Codirector:

MSc. OSCAR MANUEL DUQUE SUAREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES

PAMPLONA

2022



Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado 1

Jurado 2

Pamplona, 23 de junio de 2022.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



El presente trabajo de investigación lo quiero dedicar principalmente a Dios, por ser quien me da la fuerza y la inspiración en este magnífico proceso para cumplir unos de los anhelos más deseados.

A mis padres, esposa e hijos que siempre estuvieron motivándome y apoyándome en este difícil proceso lleno de dificultades y sacrificios, pero que al final nos devuelve con el tiempo muchas satisfacciones.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios por bendecirme la vida, por guiarme, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Agradecer a mis directores PhD. Aldo Pardo García y el MSc. Oscar Manuel Duque por su disposición, acompañamiento y asesoramiento en este trabajo de investigación, sin ellos no hubiera sido posible alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente, agradezco a mi alma mater Universidad de Pamplona y los docentes del programa de Maestría en Controles Industriales por brindarme la oportunidad de formarme y adquirir los conocimientos durante todo el proceso educativo.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



RESUMEN

El presente trabajo se trata del desarrollo y comprobación de una metodología que permita al usuario final, sintonizar un controlador difuso para sistemas multivariables MIMO (Múltiples entradas y múltiples salidas). Este lleva consigo la búsqueda de artículos que permitieron determinar dicha metodología, abordando los aspectos relevantes. La estrategia se realizó por medio de la simulación del modelo POMTM de una columna de destilación metano-agua Wood-Berry. Mediante una serie de pasos descritos en este documento en donde se realiza desde la identificación de cada una de las funciones contenidas en un sistema multivariable, el cálculo de la malla de desacople que permite eliminar el efecto de una variable sobre la otra, la sintonización del controlador clásico el cual se utilizara para el desarrollo de un controlador difuso a partir de las señales del error, delta error y salida de controlador para posteriormente realizar una confrontación entre los controladores diseñados mediante un análisis de robustez, un análisis de rendimiento por medio de los índices ISE (integral del error al cuadrado), IAE (integral del valor absoluto del error), ISU (Integral de la salida de control cuadrática) y TVU (Integral de la variación total de control). Corroborando el gran desempeño que tiene el controlador difuso con respecto a la variable 1 y a sus dos salidas de variables con respecto al ruido.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



ABSTRACT

The present work deals with the development and verification of a methodology that allows the end user to tune a fuzzy controller for multivariable MIMO (Multiple Input Multiple Output) systems. This carries with it the search for articles that allowed to determine said methodology, addressing the relevant aspects. The strategy was carried out by simulating the POMTM model of a Wood-Berry methane-water distillation column. Through a series of steps described in this document where it is carried out from the identification of each of the functions contained in a multivariable system, the calculation of the decoupling mesh that allows eliminating the effect of one variable on the other, the tuning of the classic controller which will be used for the development of a fuzzy controller from the error, delta error and controller output signals to later carry out a confrontation between the controllers designed through a robustness analysis, a performance analysis through the ISE (Integral Squared Error), IAE (Integral Absolute Value Error), ISU (Integral Quadratic Control Output) and TVU (Integral Total Control Variation) indices. Corroborating the great performance of the fuzzy controller with respect to variable 1 and its two variable outputs with respect to noise.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
JUSTIFICACIÓN	19
DELIMITACIÓN	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1 ANTECEDENTES.....	21
2.1.1 Internacionales.....	21
2.1.2 Nacionales	24
2.1.3 Locales.....	26
2.2 BASES TEÓRICAS.	27
2.2.1 Sistemas multivariables MIMO	27
2.2.1.1 Características de los sistemas MIMO	28
2.2.1.2 Selección de las salidas controladas	29
2.2.1.3 Selección de las variables manipuladas	29
2.2.2 Control de sistemas multivariables MIMO	29
2.2.2.1 Diseño del control multivariable.	30
2.2.2.2 Selección de la configuración de control.	30
2.2.2.3 Configuraciones de control	32
2.2.2.4 Estabilidad y robustez.....	33
2.2.2.5 Interacción en Sistemas Multivariables.....	35
2.2.2.6 Métodos de desacoplo o compensación.....	44
2.2.2.7 Controlador PID Auto sintonizado.....	47
2.2.3 Lógica difusa	47



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



2.2.3.1	Reglas difusas	48
2.2.3.2	Sistemas de inferencia difusa	49
2.2.3.3	Fuente de incertidumbre	51
2.2.3.4	Conjuntos difusos	51
2.2.3.5	Conjuntos borrosos	54
2.2.3.6	Tratamiento de la Incertidumbre	55
2.2.4	Sistemas de control difuso	55
2.2.4.1	Interfaz de defusificación	56
2.2.4.2	Aplicaciones de controladores difusos	56
3.	METODOLOGÍA.....	58
3.1	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	58
3.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN	58
3.3	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	58
3.4	POBLACIÓN – MUESTRA	59
3.5	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	59
3.6	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	59
4.	DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA SISTEMAS MIMO BASADA EN SISTEMAS DIFUSOS	61
4.1	INVESTIGACIÓN DE LA ESTRATEGIA.....	61
4.2	BASES DE LA ESTRATEGIA.....	73
4.3	DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA	78
5.	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DESARROLLADA PARA SISTEMAS MIMO EN UN CASO DE ESTUDIO SIMULADO.....	83
5.1	COLUMNA DE DESTILACIÓN	83
5.1.1	MODELADO MATEMÁTICO	85
5.2	PASO 1: IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO 1 (G11), PROCESO 2(G22), LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE INTERACCIÓN DE LA VARIABLE 1 CON LA VARIABLE 2 (G21) Y LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE INTERACCIÓN DE LA VARIABLE 2 CON LA VARIABLE 1 (G12)	92
5.3	PASO 2: HASTA ESTE PUNTO SE DEBEN TENER IDENTIFICADAS LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LAS VARIABLES 1 Y 2, ADEMÁS DE LAS RESPECTIVAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE INTERACCIÓN DE	



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



LAS MISMAS. CON DICHA INFORMACIÓN ES POSIBLE CALCULAR LA MALLA DE DESACOPLE PARA EL CONTROL MULTIVARIABLE.....	106
5.4 PASO 3: SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES PARA G_{11} Y G_{22} . 111	
5.4.1 Paso3.1 Sintonización del controlador para $G_{11}(s)$	112
5.4.2 Paso3.2 Sintonización del controlador para $G_{22}(s)$	115
5.5 PASO 4: ARMAR EL LAZO DE CONTROL MULTIVARIABLE	118
5.6 PASO 5: VISUALIZACIÓN DE LA SEGUNDA PROYECCIÓN	120
5.7 PASO 6: SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES $G_{11}(S)$ Y $G_{22}(S)$ CON LÓGICA DIFUSA.....	121
5.8 PASO 7: LAZO DE CONTROL MULTIVARIABLE CON CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS.....	131
5.9 PASO 8: LAZO DE CONTROL MULTIVARIABLE CON CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS CON RANGO AMPLIO	133
5.10 COMPARATIVA ENTRE CONTROLADOR DIFUSO CONTRA CONTROLADOR CLÁSICO PID PARA SISTEMAS MIMO.	136
6. CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DE LA ESTRATEGIA DESARROLLADA EN BASE A UNA COMPARATIVA CON LA TÍPICA ESTRATEGIA DE CONTROL CLÁSICO PID PARA SISTEMAS MIMO.....	139
6.1. ANÁLISIS DE ROBUSTEZ DE LOS CONTROLADORES	139
6.2 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE LOS CONTROLADORES.....	143
7. CONCLUSIONES.....	148
8. RECOMENDACIONES.....	150
9. BIBLIOGRAFÍA.....	151



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de control multivariable.	27
Figura 2. Variables según desempeño	30
Figura 3. Sistema de control centralizado	31
Figura 4. Sistema de control descentralizado	31
Figura 5. Configuraciones de control.	32
Figura 6. Modelo aumentado de incertidumbre para el análisis de robustez.	34
Figura 7. Sistema multivariable con dos entradas dos salidas	35
Figura 8. Descomposición estructural.....	41
Figura 9. Representación de un sistema mimo descompuesto en un conjunto de sistemas acoplados.	43
Figura 10. Sistema de control combinando red de desacoplamiento y controlador descentralizado.....	44
Figura 11. Sistema PID auto sintonizado.....	47
Figura 12. Precisión vs. Significado.	49
Figura 13. Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani.	49
Figura 14. Sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno.....	50
Figura 15. Sistema de inferencia difusa tipo Tsukamoto.	50
Figura 16. Clasificación de temperaturas.....	51
Figura 17. Funciones de membresía para temperaturas	52
Figura 18. Grados de pertenencia de $T=29^{\circ}\text{C}$	53
Figura 19. Función de membresía de salida.	54
Figura 20. Función de pertenencia "Valores cercanos a cero".	54
Figura 21. Lazo de control difuso.....	55



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Figura 22. Estructura de un controlador difuso	56
Figura 23. Investigaciones por año bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus	61
Figura 24. Investigaciones por país bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus	62
Figura 25. Investigaciones por área bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus	62
Figura 26. Investigaciones por tipo bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus	63
Figura 27. Investigaciones por año bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus	63
Figura 28. Investigaciones por país bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus	64
Figura 29. Investigaciones por área bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus	64
Figura 30. Investigaciones por tipo bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus.	65
Figura 31. Diagrama P&ID proceso de mezclado con control multivariable.	73
Figura 32. Diagrama en bloques sistemas multivariables	74
Figura 33. Diagrama de bloques parcial de un proceso multivariable 2x2.	75
Figura 34. Sistema interactivo general 2 x 2 con des acoplador.....	76
Figura 35. Proceso multivariable en lazo abierto.	79
Figura 36. Identificación de $G_{11}(s)$ y $G_{21}(s)$	79
Figura 37. Identificación de $G_{22}(s)$ y $G_{12}(s)$	80
Figura 38. Corroboración de la identificación del sistema.....	80
Figura 39. Diagrama esquemático de la columna.....	84
Figura 40. Diagrama esquemático de la columna.....	86



Figura 41. Respuestas en lazo abierto de la columna obtenidas por (Acharya and Dumpa,2016).	89
Figura 42. Recreación de las respuestas obtenidas por (Acharya and Dumpa,2016).	90
Figura 43. Diagrama de bloques de modelo de columna de destilación 2x2 de Wood-Berry.	91
Figura 44. Diagrama en bloques del sistema tipo caja negra.	91
Figura 45. Diagrama en bloques para la identificación de G_{11} y G_{21}	92
Figura 46 Respuesta en el tiempo de la variable Metanol destilado ante doble escalón aplicado en la entrada del caudal de reflujo de vapor.	93
Figura 47.Respuesta en el tiempo de la variable 2 ante doble escalón aplicado en la entrada 1.....	94
Figura 48.Respuesta del proceso 1 para la identificación de $G_{11}(s)$	94
Figura 49.Ubicación de los dos puntos para la identificación de G_{11}	96
Figura 50.Respuesta del proceso 2 para la identificación de $G_{21}(s)$	97
Figura 51.Ubicación de los dos puntos para la identificación de $G_{21}(s)$	98
Figura 52. Diagrama en bloques para la identificación de G_{22} y G_{12}	99
Figura 53.Respuesta en el tiempo de la variable 2 ante doble escalón aplicado en la entrada 2.....	100
Figura 54.Respuesta en el tiempo de la variable 1 ante doble escalón aplicado en la entrada 2.....	100
Figura 55.Respuesta del proceso 2 para la identificación de $G_{22}(s)$	101
Figura 56.Ubicación de los dos puntos para la identificación de $G_{22}(s)$	102
Figura 57.Respuesta del proceso 1 para la identificación de $G_{12}(s)$	103
Figura 58.Ubicación de los dos puntos para la identificación de $G_{12}(s)$	104
Figura 59. Diagrama en bloques comparación sistema real y sistema identificado.	105
Figura 60.Comparación de la variable 1 real e identificada.	105



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Figura 61.Comparación de la variable 2 real e identificada.	106
Figura 62. Diagrama en bloques de comparación entre sistema identificado con tiempo muerto y sistema identificado con aproximación de Taylor	107
Figura 63.Comparación con tiempo muerto y aproximación de Taylor para la variable 1.....	108
Figura 64.Comparación con tiempo muerto y aproximación de Taylor para la variable 2.....	108
Figura 65.Diagrama de bloques para probar el funcionamiento de la malla en el proceso 1	109
Figura 66.Respuesta obtenida en la salida 1 al aplicar un escalon en la entrada 1	109
Figura 67.Respuesta obtenida en la salida 2 aplicar un escalon en la entrada 1	110
Figura 68.Diagrama de bloques para probar el funcionamiento de la malla en el proceso 2	110
Figura 69.Respuesta obtenida en la salida 2 al aplicar un escalón en la entrada 2	110
Figura 70.Respuesta obtenida en la salida 2 al aplicar un escalón en la entrada 2	111
Figura 71 Diagrama en bloques del lazo de control de G11(s).	113
Figura 72 Respuesta del lazo cerrado para la variable 1.	113
Figura 73 Diagrama en bloques del lazo de control de G22(s).	116
Figura 74 Respuesta del lazo cerrado para la variable 2.	116
Figura 75 Diagrama en bloques del lazo de control multivariable.	118
Figura 76 Respuesta de la variable 1 para un setpoint de 50.	119
Figura 77 Respuesta de la variable 2 para un setpoint de 1.	119
Figura 78 Diagrama de bloques para visualizar la segunda proyección.	120
Figura 79 Influencia de la variable 1 sobre la variable 2	120
Figura 80 Influencia de la variable 2 sobre la variable 1	121





Figura 81 Lazo del proceso instrumentado contemplando el error, delta error y señal de control U de G11 y G22	122
Figura 82. Diagrama de bloques de bloques del lazo de control multivariable con controladores lógicos difusos.....	131
Figura 83.Respuesta de la variable 1 en lazo cerrado con controlador Fuzzy ante un Setpoint de 50.....	132
Figura 84.Respuesta de la variable 2 en lazo cerrado con controlador Fuzzy ante un Setpoint de 1.....	133
Figura 85.Diagrama de bloques para encontrar las ganancias.....	133
Figura 86. Interfaz de la herramienta cftool para la obtención del polinomio del controlador difuso que controla el destilado de metanol.	135
Figura 87.Interfaz de la herramienta cftool para la obtención del polinomio del controlador difuso que controla el porcentaje del agua.....	135
Figura 88. Diagrama de bloques de la columna con la implementación de los controladores difusos funcionando en rango amplio.....	136
Figura 89.Confrontación entre controlador Fuzzy y PID clásico para sistema MIMO.	137
Figura 90.Confrontación entre salida del controlador Fuzzy y el PID clásico para la variable 1.	137
Figura 91.Confrontación entre salida del controlador Fuzzy y el PID clásico para la variable 2.	138
Figura 92.Lazo de control multivariable con controladores clásicos sometido ruido y perturbaciones.	139
Figura 93.Confrontación del controlador difuso contra el PI clásico en la variable 1 frente a ruido y perturbación.	140
Figura 94.Confrontación del controlador difuso contra el PI clásico en la variable 1 frente a ruido y perturbación.	140
Figura 95. Variando el setpoint 20 % arriba del setpoint comparado variable 1 ..	141
Figura 96 .Variando el setpoint 20 % arriba del setpoint comparado variable 2 ..	141
Figura 97. Variando el setpoint 20 % por debajo del setpoint comparado variable 1	142



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Figura 98. Variando el setpoint 20 % por debajo del setpoint comparado variable 2	142
Figura 99. Rendimiento del control multivariable clásico en la variable 1.	144
Figura 100. Rendimiento del control multivariable clásico en la variable 2.	145
Figura 101. Rendimiento del control multivariable difuso en la variable 1.	145
Figura 102. Rendimiento del control multivariable difuso en la variable 2.	146



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de variables	28
Tabla 2 relación nivel de confianza - puntuación z	66
Tabla 3. Investigaciones de muestra de control multivariable	67
Tabla 4. Nomenclatura	87
Tabla 5. Datos para la identificación de G_{11} y G_{21}	93
Tabla 6. Datos para la identificación de G_{22} y G_{12}	99
Tabla 7. Ajuste del controlador PID de $G_{11}(s)$	113
Tabla 8. Ajuste del controlador PID de $G_{22}(s)$	117
Tabla 9 comportamiento de los universos de G_{11}	122
Tabla 10 comportamiento de los universos de G_{22}	123
Tabla 11. Tipos de controladores difusos	125
Tabla 12 Datos del controlador $G_{11}(S)$ difuso	126
Tabla 13 Datos del controlador $G_{22}(S)$ difuso	127
Tabla 14. Evaluación de universo de salida, respecto a los universos de entrada.	129
Tabla 15. Evaluación de universo de salida, respecto a los universos de entrada.	130
Tabla 16. Ganancias que requiere el controlador del proceso 1 a determinado setpoint	134
Tabla 17 .Ganancias que requiere el controlador del proceso 1 a determinado setpoint	134
Tabla 18. Resultados de la evaluación de rendimiento	146



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siempre que se presenta una interdependencia entre dos variables que influyen en un mismo proceso se hace necesario llevar a cabo un proceso de desacoplo que permita independizar y tratar el proceso multivariable como un proceso de única entrada única salida. En función de lo anterior existen diversas estrategias de control que pueden encajarse en los también llamados sistemas MIMO, siendo estas estrategias enfocadas principalmente al desarrollo de controles clásicos que se ejecutan una vez se ha ejecutado el desacoplo. Donde la implementación de estrategias de control clásico ya ha sido muy ahondada y cierran las puertas a nuevas investigaciones, las cuales se enmarquen en técnicas de control inteligente, siendo factible pensar en una estrategia de control que se separe del control clásico realimentado y sea llevado al control difuso.

También existe una ausencia de procedimientos que faciliten la implementación de control para procesos multivariables desde nuevos puntos de vista. Además de que el tratamiento de dichos procesos conlleva un grado de dificultad más elevado con respecto a los procesos mono variables, lo cual puede predisponer a quienes les interese implementar un control multivariable.

Formalización:

¿El desarrollo de una estrategia de control multivariable basado en control difuso facilita y promueve la implementación del control difuso sobre el clásico y los resultados podrían mejorar a los obtenidos con dicho control clásico?



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



JUSTIFICACIÓN

Llevar a cabo el diseño de una estrategia de control multivariable difuso podría permitir aplicar de forma fácil controladores difusos a sistemas MIMO, con lo cual se abriría dominio a un mundo de posibilidades donde se permita aplicar el control difuso de una manera más común a procesos multivariados presentes en ambientes industriales o de características científicas con el fin de validar la efectividad que muestran normalmente los controladores difusos en aspectos como la optimización del comportamiento ante ruidos y perturbaciones.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



DELIMITACIÓN

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una estrategia de control difuso para sistemas multivariables MIMO.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los métodos y procedimientos que permiten controlar sistemas MIMO y las bases para el acoplamiento del estudio realizado a un sistema de control difuso.
- Diseñar la estrategia de control para sistemas MIMO basada en sistemas difusos.
- Implementar la estrategia desarrollada para sistemas MIMO en un caso de estudio simulado.
- Validar la estrategia desarrollada en base a una comparativa con la típica estrategia de control clásico PID para sistemas MIMO.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Internacionales

(Yurkevich, 2015) presenta en Rusia en el año 2015 el diseño de controladores MIMO Tracking PI/PID para sistemas no lineales basados en la técnica de perturbación singular¹. Donde se analiza el problema del diseño del controlador multivariable PI/PID de seguimiento basado en la técnica de separación a escala de tiempo (técnica de perturbación singular) para sistemas no lineales MIMO. Aporta una metodología de diseño que garantiza un rechazo casi perfecto de las no linealidades, las perturbaciones externas desconocidas y las interacciones entre bucles debido al aumento del grado de separación a escala de tiempo entre los modos rápidos y lentos que se fuerzan artificialmente en el sistema de bucle cerrado.

Según (Ci Chen et al, 2016)² proponen un método de control asintótico difuso adaptativo para sistemas MIMO no lineales con coeficientes de entrada desconocidos, con un enfoque en el manejo de direcciones de control y no linealidades de entrada desconocidas. Para todos los enfoques existentes basados en la ganancia de Nussbaum, es difícil investigar el problema de los coeficientes de entrada desconocidos ya que múltiples variables en el tiempo los coeficientes y las perturbaciones coexisten y deben abordarse simultáneamente en el análisis de estabilidad. Para superar la dificultad anterior, proponemos un enfoque robusto basado en la ganancia de Nussbaum para el control asintótico difuso adaptativo de sistemas no lineales MIMO. Beneficiándose del enfoque propuesto basado en la ganancia de Nussbaum, se manejan las perturbaciones limitadas que incluyen la dinámica del sistema sin modelar y los errores de aproximación universal. Además, el enfoque propuesto ayuda a extender el resultado del control difuso acotado a la convergencia asintótica. Por lo tanto, tanto la robustez del control como la precisión del control se solicitan dentro del marco del enfoque de ganancia de Nussbaum desarrollado. Finalmente, se lleva a cabo un ejemplo de simulación para ilustrar la efectividad del método de control propuesto.

¹ Yurkevich, V. D. (2015). *MIMO tracking PI/PID controller design for nonlinear systems based on singular perturbation technique*.

² Ci Chen et al. (2016). Adaptive fuzzy asymptotic control of MIMO systems with unknown input coefficients via a robust nussbaum gain based approach. (IEEE) (IEEE, 2016), 1.



(Kalpana, Thyagarajan & Venkatachalam, 2017)³ proponen en este documento, un diseño basado en retroalimentación de relé de un controlador PI de orden fraccional para un sistema MIMO 2 por 2. Los estudios se realizan en una columna de destilación Wood and Berry (WB). El esquema del controlador PI de orden fraccionario se comparó con el controlador PI de orden entero. Los parámetros del controlador del controlador PI de orden fraccionario y del controlador PI de orden entero se obtuvieron mediante la prueba de retroalimentación de relé. Los estudios de simulación de bucle cerrado se realizaron tanto para el seguimiento del punto de ajuste como para el rechazo de perturbaciones de carga. El trabajo también incluye estudios de robustez del esquema propuesto. El desempeño se midió utilizando Integral de Tiempo y Error Absoluto (ITAE). Se destacan las ventajas del esquema propuesto.

(Margun, Furtat, & Kremlev, Robust control of twin rotor MIMO system with quantized output, 2017) en el año 2017 presentan en Rusia un Control robusto del sistema MIMO de doble rotor con salida cuantificada ⁴. En su investigación solo se supone que se mide la salida cuantificada. La síntesis del controlador se basa en el enfoque de compensador consecutivo. La investigación experimental se realiza con el uso de helicóptero como el banco de laboratorio MIMO de doble rotor. Los experimentos muestran la eficiencia del método de control propuesto en comparación con el controlador PID. Aporta un diseño y aplicación experimental de un controlador robusto para plantas MIMO bajo incertidumbres paramétricas, perturbaciones externas y medición de salida cuantificada.

(Galluppi, Formentin, Novara, & Savaresi, 2017) en el año 2017 presentan en Italia un Control de estabilidad no lineal de los vehículos autónomos: un MIMO D2-Solución IBC⁵. Los autores diseñan un control de estabilidad del vehículo no lineal mediante el uso de la D2-Método IBC (Data Driven - Inversion Based Control), en el que la dinámica del sistema no se modela a partir de datos para optimizar la coincidencia del modelo de bucle abierto, sino para maximizar el rendimiento de bucle cerrado. Este método demuestra su eficacia en un simulador multi-cuerpo de un vehículo autónomo de dirección de 4 ruedas. La investigación aporta en detalle lo que respecta a la aplicación de control de estabilidad.

(Mahmoud, 2018) en el año 2018 presenta en Bakú la Amortiguación de los efectos de sobretensión y mejora de la respuesta dinámica de la planta de destilación mediante el control difuso MIMO ⁶. El proceso de destilación es un proceso

³ Kalpana, Thyagarajan & Venkatachalam, Design of fractional order pi controller for MIMO system using relay feedback. (IEEE) (IEEE, 2017), 1.

⁴ Margun, A., Furtat, I., & Kremlev, A. (2017). *Robust control of twin rotor MIMO system with quantized output*.

⁵ Galluppi, O., Formentin, S., Novara, C., & Savaresi, S. M. (2017). Nonlinear stability control of autonomous vehicles: a MIMO D2-IBC solution.

⁶ Mahmoud, M. M. (2018). Damping of surge effects and enhancement of dynamic response of distillation plant using MIMO fuzzy control.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



controlado que debe realizarse con la máxima eficiencia y con la más alta calidad. En su trabajo, debido a la complejidad y no linealidad del proceso, la planta de destilación y el controlador difuso inteligente, que se utiliza para amortiguar las sobretensiones y mejorar el proceso, se simulan en MATLAB. Aporta un nuevo diseño de control difuso para el separador. Dicho diseño está basado en la utilización de la estimación de estado lineal para generar la base de conocimiento interna que almacena pares de entrada- salida. Esta colección de pares se utiliza entonces para construir un controlador difuso MIMO de retroalimentación, donde el sistema de control difuso de bucle cerrado propuesto mantiene el sistema asintóticamente-estable mientras mejora la respuesta de tiempo del sistema y reduce el efecto de las sobretensiones para lograr un mejor control de la concentración de la torre.

(Goud, Rao A, & Chidambaram, 2020) en el año 2020 presentan en India un Diseño mejorado del controlador PID descentralizado para procesos MIMO⁷. Los autores proponen un diseño mejorado de un controlador PID descentralizado para los procesos de retardo de tiempo multivariable. En este método, el método Haalman se extiende para cada proceso de entrada única y salida única. El método se basa en mantener la función de transferencia de bucle abierto igual que la necesaria para una integración con el modelo de función de transferencia de retardo de tiempo. El método no implica ningún parámetro de ajuste. El diseño de los controladores MIMO PID se basa en desafinar solamente la ganancia proporcional. El estudio de rendimiento del controlador se llevó a cabo en tres modelos de funciones de transferencia estables multivariables, donde las actuaciones del bucle cerrado se evalúan en términos de error cuadrado integral (ISE), valores del error absoluto integral (IAE) y varianza total (TV). Aporta un método que proporciona mejores rendimientos de bucle cerrado para los parámetros perfectos e incertidumbres en el modelo de proceso en comparación con los métodos notificados recientemente.

(Yang, Zhao, Wang & Yu, 2021) realizaron un reactor multimodular, que conecta varias unidades de reactor para impulsar una sola turbina, se considera una innovación en el sistema de energía nuclear⁸. Dado que varias unidades de reactor están acopladas entre sí por el bucle secundario común, el cambio de carga de cualquier reactor afectará a su propia temperatura de refrigerante y también a la potencia de otras unidades de reactor. Obviamente es ese módulo coordinado controles importante para la operación segura y estable del reactor multimodular, lo que induce a la necesidad del estudio en coordinación de módulos. Motivado por esto, este trabajo propone el método de desacoplamiento entre cada módulo para realizar el coordinado control del reactor multimodular. una operación y control. Se realiza la simulación del reactor de plomo multimodular basado en el reactor de

⁷ Goud, E. C., Rao A, S., & Chidambaram, M. (2020). Improved decentralized PID controller design for MIMO processes.

⁸ Yang, X., Zhao, C., Wang, J., Yu, J., Yang, M. Module coordination control of multi-modular lead-based reactor systems (2022) Annals of Nuclear Energy, 168, art. no. 108873, .





investigación de plomo de China (CLEAR-I). El método de identificación en el dominio de la frecuencia combinado con el multivariable. Se propone un método de respuesta de frecuencia para realizar el desacoplamiento efectivo del sistema. El propósito de este método es reducir la complejidad del control diseño del sistema y hacer pleno uso de la tecnología de diseño asistido por computadora. La matriz de función de transferencia del sistema se identifica a través de los experimentos de respuesta de frecuencia. Se adopta el método de dominancia pseudo diagonal para desarrollar la matriz de compensación dominante diagonal constante para la función de transferencia inversa, y luego se adopta el método de matriz de Nyquist inversa (INA) para diseñar el controlador para el sistema compensado. El diseño del sistema de múltiples entradas y múltiples salidas se simplifica a una serie de diseños de sistemas de una sola variable. Los resultados numéricos muestran la factibilidad y satisfactoria control actuación.

2.1.2 Nacionales

(Barrera & Barrios Urueña, 2017) presentan un Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor⁹. Los autores describen la validación de los diseños de control multivariable lineal en un intercambiador de calor bajo ambiente virtual usando Hysys. Se usaron tres tipos de des acopladores: Simplificado de Estado Estacionario, Simplificado y Generalizado. Los valores de las consignas fueron 60 °C para la temperatura del caudal a la salida de los tubos, y 41 °C para la temperatura del caudal a la salida de la carcasa; las variables manipuladas fueron los caudales de entrada a los tubos y la carcasa, gracias a los porcentajes de apertura de las válvulas correspondientes. Se emplearon controladores PI que fueron sintonizados con la aplicación del diseño IMC. Aporta un análisis de las diferentes respuestas del sistema MIMO cuando se realiza el control regulatorio con diferentes desacopladores y sin des acoplador. De los resultados se pudo apreciar que el desacople simplificado fue el que más disminuyó el efecto del acoplamiento.

(Caballero, F, 2018)¹⁰ Empieza su artículo por la motivación de buscar medios que permitan ser más eficientes a las organizaciones, procesos, personas y considerando la seguridad y el medio ambiente se plantea esta tesis con el objetivo fundamental de maximizar la producción lo cual lleva a tener mayores flujos de mineral procesado y menores consumos de energía y agua. Para lo cual se diseña un control basado en lógica difusa, el cual permite controlar la variación de flujo de alimentación del mineral al molino, así como el caudal de agua alimentación al cajón

⁹ Barrera, J. F., & Barrios Urueña, E. (2017). Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor, p 17-25.

¹⁰ Caballero, F. Diseño de una estrategia de control multivariable para el incremento del régimen de carga de mineral en el área de Molienda de una planta concentradora usando lógica difusa. (Repositorios latinoamericanos) (Repositorios latinoamericanos, 2018), 1.



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



de descarga del molino. Para ello se consideran cuatro variables de control: la granulometría que debe ser controlado en un valor máximo deseado, la potencia del motor del molino el cual se debe mantener en valores mínimos deseados, el amperaje del motor de la bomba de ciclones que debe ser controlado en un valor máximo deseado y el nivel del cajón de descarga que se debe mantener en un valor máximo deseado, con estas cuatro consideraciones se espera que el molino opere sin cortes de carga ya sea debido a sobrecargas, así como por el riesgo de paradas de la bomba de ciclones o por el alto nivel del cajón, para que de esta manera se envíe una pulpa de mineral con una calidad de la granulometría adecuada a la etapa de flotación rougher.

(Ortiz & Garcia Jaimes, 2019) presentan la automatización del proceso de secado de producto húmedo, usando un método de control multivariable simplificado¹¹. Los autores realizan el diseño e implementación de un sistema de control multivariable para un proceso productivo de secado de producto húmedo en un secador a chorro, utilizando controladores PI y des acopladores de tipo simplificado. El objetivo principal de esta implementación fue reducir la cantidad de producto no conforme que se genera en una compañía del sector minero, por la manipulación manual de las variables de entrada y de salida, por la fuerte interacción entre ellas y por el efecto de las perturbaciones en el proceso que generan pérdidas tanto en tiempo como en el producto. Para el diseño se realizó la identificación del proceso, se estimaron los controladores PI fuera de línea y, finalmente se realizó el diseño de los desacopladores. Los resultados obtenidos a escala de simulación y en el proceso real demostraron la efectividad del sistema de control diseñado. Aporta una buena perspectiva de los resultados con y sin desacoplo, bajo análisis de rendimiento.

(Rivera, Cortés & Giraldo, 2021) presentan un método de ajuste óptimo para controladores multivariables Fuzzy acoplados¹². El procedimiento se basa en la optimización mediante algoritmos genéticos de una función de coste del error cuadrático. El método de ajuste de controladores se puede aplicar al diseño de sistemas necesarios para cumplir con los criterios de diseño, teniendo en cuenta la dinámica inherente del sistema. El método propuesto se evalúa en un helicóptero a escala de dos grados de libertad que modela un sistema de vehículo aéreo no tripulado a escala utilizando el error cuadrático como función de costo. El desempeño óptimo propuesto del controlador Fuzzy se compara con un controlador MIMO PID bajo dos estructuras distintas: acoplado y desacoplado, considerando el mismo método de ajuste óptimo con algoritmos genéticos. Además, el sistema se

¹¹ Ortiz, H. A., & Garcia Jaimes, L. E. (2019). Automatización del proceso de secado de producto húmedo, usando un método de control multivariable simplificado, p 20-30.

¹² López-Rivera, M., Cortés-Villada, A.C., Giraldo, E. Optimal Multivariable Control Design based on a Fuzzy Model for an Unmanned Aerial Vehicle (2021) IAENG International Journal of Computer Science, 48 (2), pp. 1-6.



valida mediante el uso de un controlador de espacio de estado de retroalimentación con una estructura acoplada.

(Rodríguez & Olachica Torres, 2020) presentan un Controlador QFT en tiempo real para la humedad y temperatura en el invernadero¹³. Los autores realizan el diseño de un controlador QFT multivariable en tiempo real a partir de una red de desacoplo para controlar la humedad y temperatura en un invernadero a escala. Se emplea el método de identificación de sistema tipo caja negra, al establecer una función de transferencia a partir de las variables de entrada y salida del proceso. El sistema emplea un termistor como sensor de temperatura y un sensor de humedad relativa HIH 4030 para la toma de datos analógicos de las variables del proceso, como actuadores se utiliza un calefactor y un humidificador tipo niebla ultrasónico, que generarán la temperatura y la humedad requerida para el invernadero. La adquisición de datos digital se realiza mediante la tarjeta PCI 6014 de la National Instrument® para la toma de datos generados dentro del sistema mediante pruebas que se ejecuten en el invernadero a partir de un modelo de Simulink de Matlab®. El desempeño de control tiene una respuesta dinámica de control con 1% de error en estado estable, acción de control < 1% y tiempo de establecimiento cercano a los 1100 s para temperatura y 1000 s para humedad relativa. Aporta un procedimiento para la ejecución de una metodología basada en el desacoplo de las variables.

2.1.3 Locales

(V., Ramón V., & Carrillo, 2011) realizan el Diseño de un sistema de supervisión y control multivariable por medio de un sistema SCADA para una planta piloto en fases separadas de biodigestión anaeróbica¹⁴. Los autores presentan un proyecto enfocado hacia la automatización de un biodigestor a escala piloto, a partir de un sistema de control y monitoreo, para mejorar la eficiencia, seguridad y confiabilidad del proceso. Aporta un modelo base o teórico en investigaciones para la producción de biogás de forma eficiente. La investigación se llevó en varias etapas fundamentales teniendo el diagnóstico preliminar, el diseño-construcción, el cálculo-modelado, y el desarrollo del sistema completo de automatización y control del biodigestor.

(Guerra, 2012) presenta un Control predictivo multivariable con linealización sucesiva y targets de entrada¹⁵. El objetivo principal fue evaluar el efecto del uso de targets de entrada sobre el desempeño del sistema controlado. Los resultados

¹³ Rodríguez, R. A., & Olachica Torres, Á. (2020). Real time QFT controller for humidity and temperature in greenhouse, p 1-6.

¹⁴ V., J. A., Ramón V., B., & Carrillo, E. (2011). Design of a monitoring and control multivariable system through a SCADA system for separate plant anaerobic biodigestion. p 32–39.

¹⁵ Guerra, I. (2012). Control predictivo multivariable con linealización sucesiva y targets de entrada, p 72–79.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

mostraron una reducción del 50% de las variaciones de la concentración de sustrato del efluente, una disminución del 85% en el consumo de energía de bombeo y menor carga de contaminación en el efluente, con el uso de targets de entrada, lo que demostró la utilidad de estos para mejorar el rendimiento del proceso. Guerra aporta dos propuestas de MPC multivariable con linealización sucesiva para controlar un proceso de fangos activados no cuadrado (más entradas que salidas). La primera propuesta utiliza una función objetivo estándar en la que son penalizadas las desviaciones de las salidas y los cambios en las variables manipuladas. En la segunda, se adiciona un término a la estándar que penaliza las desviaciones de las variables manipuladas de su valor en estado estacionario (targets de entrada).

(Espol et al, 2019)¹⁶ realizan la investigación desarrollada para el diseño de controladores pid y difuso multivariable en presencia de cambios en la temperatura y presión en una planta didáctica. esta planta utiliza intercambiadores de calor de placas; y en la cual la viscosidad del fluido es variable con respecto a la temperatura y presión, se consideran variaciones del punto de trabajo y presencia de perturbaciones entre sí de las variables a controlar. Utilizando el software Matlab se extraen los datos necesarios. El estudio se lo realiza sólo al primer intercambiador de calor, con las variables temperatura y presión o caudal de los fluidos que intercambian calor.

2.2 BASES TEÓRICAS.

2.2.1 Sistemas multivariables MIMO

Un sistema MIMO (Múltiples entradas múltiples salidas) según (Fariñas, 2006)¹⁷ “Es cuando el número de entradas y número de salidas es superior a la unidad” (p 72.). Teniendo como principales características la direccionalidad y el acoplamiento; características que lo diferencian de un sistema mono variable SISO (Única entrada única salida). Siendo un sistema multivariable como se representa en la Figura 1.

Figura 1 Sistema de control multivariable.



Fuente: (Fariñas, 2006).

¹⁶ Espol et al. *Diseño de un controlador difuso multivariable para el control de un intercambiador a calor en una planta didáctica. (la referencia)* (La referencia, 2019). Ecuador, 1.

¹⁷ Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables*



En el sistema multivariable se pueden presentar algunos problemas que pueden llegar a dificultar la operación del proceso y el diseño de su sistema de control. Algunos de estos problemas no solo son el excesivo número de variables sino también el grado de interacción que existe entre ellas, como lo afirma (Jurado, 2012)¹⁸ “debido a que una variable de entrada afecta en mayor o menor grado a todas las variables de salida” (p 2.). En la tabla 1 se realizó una descripción sobre el tipo de variables presentes en el sistema a controlar.

Tabla 1. Tipos de variables

Tipo de Variables	Descripción
Variables controladas	Estas variables afectan directamente al proceso, se les llama variables dependientes.
Variables manipuladas	Modifica directamente la variable controlada, son llamadas también variables independientes, esta es establecida por el operador.
Variables de perturbación	Esta afecta directamente el valor de salida, provoca variaciones, pero no pueden ser manipuladas por el controlador

Fuente: (Hergueta, s.f.) Tabla realizada en adaptación a la información.

2.2.1.1 Características de los sistemas MIMO

Montero planeta en resumen las principales características principales como las siguientes:

- La viabilidad del control depende del proceso total, no sólo de las relaciones causa efecto de las variables individuales.

¹⁸ Jurado, J. G. (2012). Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID.



- El emparejamiento de las variables medidas y las variables controladas es una decisión de diseño. El número de variables manipuladas y controladas puede ser diferente.
- Los diseños de los sistemas de control multivariable son más sensibles a los errores de modelado.
- Los efectos de la interacción dificultan el diseño de los sistemas de control ¹⁹.

2.2.1.2 Selección de las salidas controladas

Para la selección de las variables a las cuales se les va aplicar el control se tiene que tener en cuenta que deben ser elegidas de las variables de salida y que estas a su vez sean independientes entre sí. ²⁰

2.2.1.3 Selección de las variables manipuladas

Estas se seleccionan de las variables deben de ser accesibles para el operador ya sea de manera manual o automática, se tiene que tener en cuenta que estas variables se puedan modificar sus valores y que interfieran al sistema. ²¹

2.2.2 Control de sistemas multivariables MIMO

El control de sistema tiene como objetivo mantener las variables controladas en un valor deseado a pesar de las perturbaciones que puedan afectar el sistema por medio de un diseño de estrategias que permitan orientar las variables manipuladas ²². De acuerdo al papel que desempeñan se clasifican como se muestra en la Figura 2.

¹⁹ Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables* p. 4.

²⁰ Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables*

²¹ Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables*

²² Jurado, J. G. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Figura 2. Variables según desempeño



Fuente: (Jurado, 2012).

2.2.2.1 Diseño del control multivariable.

Se debe tener en cuenta especificaciones de diseño, desempeño de la planta, características del modelo, para eso es necesario tener una clara y precisa descripción de las características dinámicas del sistema, y poder hacer una apropiada selección de las entradas de la planta y las especificaciones de diseño ²³.

Respecto al control de sistemas multivariables es un poco complejo debido a las interacciones y acoples que se presentan entre las entradas y salidas, Giraldo afirma que “es posible considerar estos sistemas multivariables como sistemas desacoplados y los efectos de los acoples como perturbaciones” ²⁴.

2.2.2.2 Selección de la configuración de control.

- Control multivariable centralizado

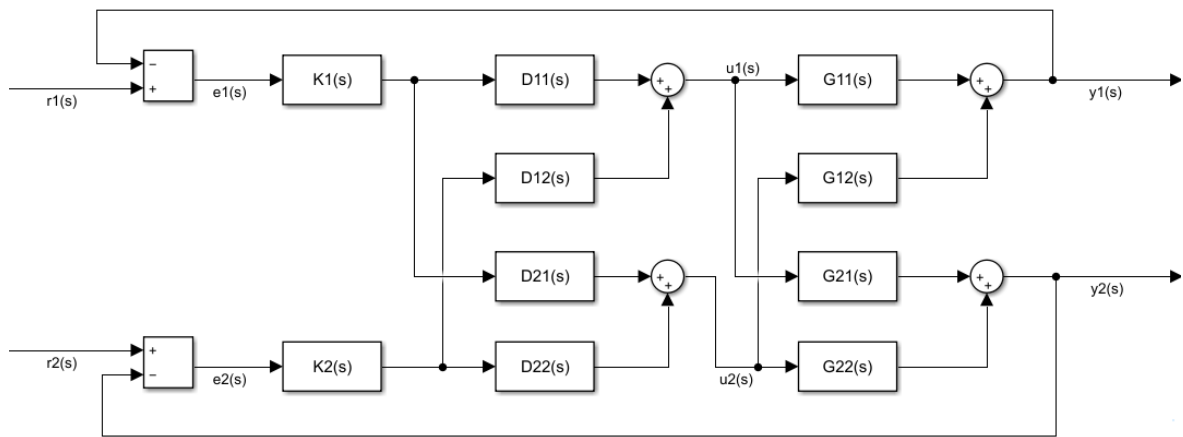
Básicamente es en donde todas las variables medidas tienen influencia en el cálculo de todas las acciones de control de forma simultánea, es decir todas las acciones de control están disponibles para contrarrestar el efecto de cualquier perturbación en cualquiera de las variables controladas ²⁵, en la figura 3 tenemos un ejemplo de un control multivariable con 2 variables controladas con su respectivo desacople.

²³ Fuentes, J. I. (2003). *Análisis y diseño de un sistema de control multivariable para el dispositivo "Twin Rotor MIMO System"*. p. 13.

²⁴ Eduardo Giraldo Suárez, “Adaptive sliding mode control of a multivariable decoupled system”, 2007, 101–5. p. 1.

²⁵ Juan Calderón, “Control De Procesos Multivariables Mediante” (Universidad Nacional de Colombia, 2009). p. 35.

Figura 3. Sistema de control centralizado

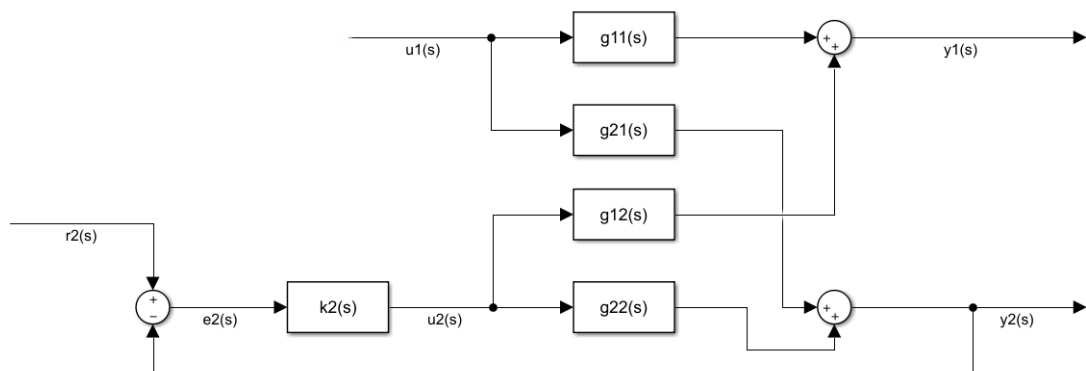


Fuente: (Alarcón, 2009).

- Control descentralizado

Corresponde a un sistema de control compuesto por controladores realimentados independientes que interconectan un subconjunto de variables de salida con otro subconjunto de variables de entrada. Estos subconjuntos no lo usan ningún otro controlador ²⁶, el diagrama de bloques de la figura 4 representa una planta que tiene un control de una de las variables sin desacoplar la interacción entre los procesos internos de esta.

Figura 4. Sistema de control descentralizado



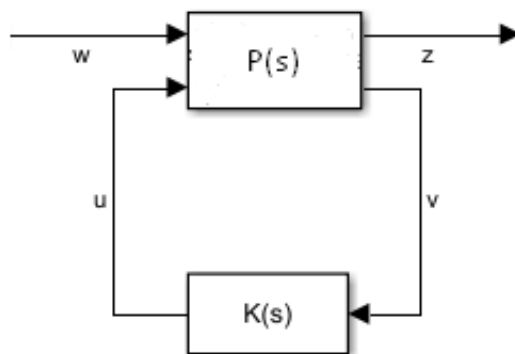
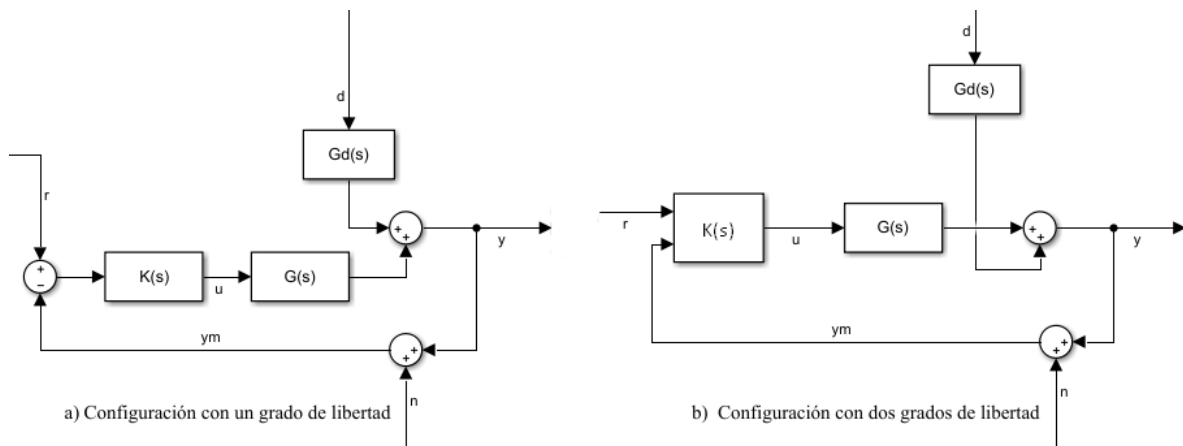
Fuente: (Fariñas, 2006).

²⁶ Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables*. p. 5.

2.2.2.3 Configuraciones de control

Garrido nos presente que “en cualquier sistema multivariable se puede clasificar principalmente 3 tipos de configuración: configuración con un grado de libertad, configuración con dos grados de libertad y configuración general”²⁷. Esquemas que son representado en la siguiente Figura 5

Figura 5. Configuraciones de control.



c) Configuración general

²⁷ Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables*. p. 16.



Donde,

- $K(s)$ es la matriz de funciones de transferencia del controlador multivariable, ya sea descentralizado o centralizado,
- $G(s)$ es el modelo del proceso,
- $G_d(s)$ es el modelo de las perturbaciones,
- El vector de variables controladas,
- r es el vector de señales de referencia,
- d es el conjunto de perturbaciones,
- n es el conjunto de señales de ruido sobre las variables controladas,
- y_m es el vector de medida de las variables controladas,
- u es el vector de variables manipuladas,
- $P(s)$ es un modelo de planta generalizado que incluye a $G(s)$, $G_d(s)$ y la estructura de conexiones entre el proceso y el controlador,
- w es el conjunto de entradas externas al proceso (perturbaciones y ruidos),
- z es el conjunto de señales que se sacan al exterior con diversos fines (supervisión, optimización, etc.), y
- v son las entradas al controlador en la configuración general.

2.2.2.4 Estabilidad y robustez

Lo que nos permite este método es obtener un parámetro de la incertidumbre aproximada para garantizar cierta probabilidad alta que un diseño de un proceso pueda funcionar.

Lo que propone prieto en la necesidad de calcular los tipos de incertidumbre es dos modelos matemáticos que permitan cuantificar las posibles variaciones del proceso: “el primero, Linear Fractional Transformations (LFT), utilizado como función matricial que permite la representación unificada de diferentes tipos de



SC-CER96940

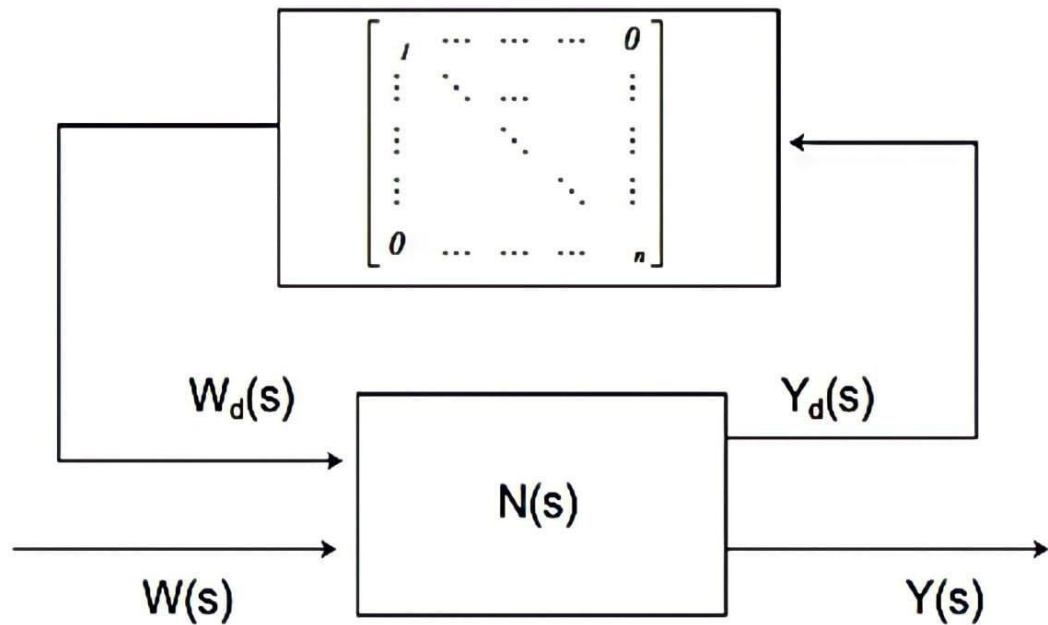


“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

incertidumbre en un modelo; el segundo, la Structured Singular Value function (SSV o μ), en términos de la cual es posible establecer una condición necesaria y suficiente para la prueba de robustez con una moderada complejidad computacional²⁸, en la figura 6 tenemos un ejemplo de lo mencionado anteriormente.

Figura 6. Modelo aumentado de incertidumbre para el análisis de robustez.



Fuente: Plantea que para alcanzar la estabilidad robusta se deben cumplir la siguiente condición, (Jurado, 2012).

Garrido²⁹ plantea que para alcanzar la estabilidad robusta se deben cumplir la siguiente condición

$$\mu_{RS} = \mu - Wls \cdot Tls < 1 \forall \omega \quad (1)$$

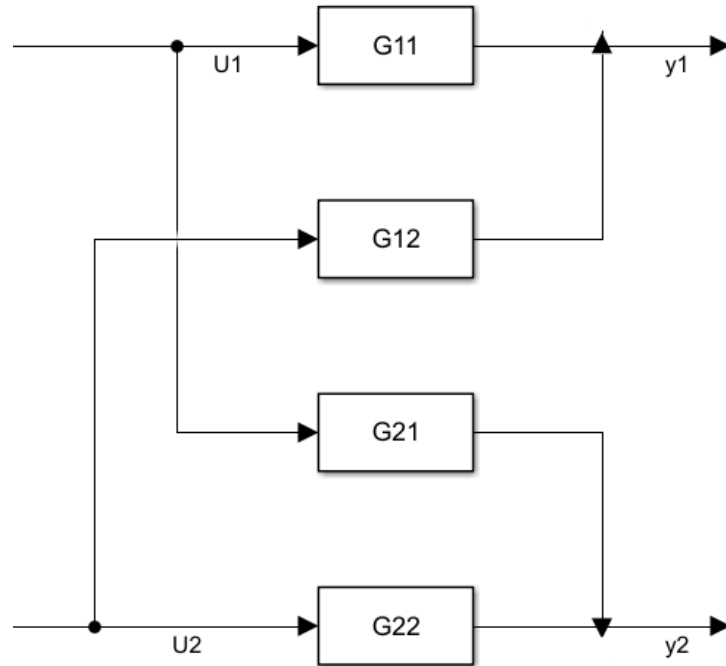
²⁸ Luis Prieto Martínez, “Análisis de la robustez en la estabilidad y el desempeño de un sistema de control lateral para automóviles”, *Ingeniería y universidad*, 8.2 (2004), 113–38. p. 116.

²⁹ Jurado, J. G. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*. p. 18.

2.2.2.5 Interacción en Sistemas Multivariables

Se asume la existencia como se muestra en la figura 7 usada por J. espinosa ³⁰.

Figura 7. Sistema multivariable con dos entradas dos salidas



Fuente: (Oviedo, 2003).

Salidas las cuales se representan como se observa en las Ecuaciones 2 y 3.

$$y_1 = G_{11}u_1 + G_{12}u_2 \quad (2)$$

$$y_2 = G_{21}u_1 + G_{22}u_2 \quad (3)$$

Entonces si existe interacción si la respuesta de una variable controlada frente al cambio de una variable manipulada cambia al cerrar otro de los lazos presentes en el sistema. ³¹

³⁰ Jairo Espinosa, *Control lineal de sistemas multivariables*, SpringerReference, 2003 <https://doi.org/10.1007/springerreference_11122>. p. 26.

³¹ Espinosa. p. 25.



- Matriz de Ganancias Relativas

Nos permite evaluar de manera más fácil las interacciones entre las variables manipuladas y controladas para seleccionar la mejor estructura en sistemas de control descentralizado. (Alarcón, 2009)³² indica la solución del método en 3 simples pasos:

- I. Definición de la matriz de ganancias relativas (RGA).
- II. Cálculo de la matriz de ganancias relativas.
- III. Análisis de la matriz de ganancias relativas.

Dichas ganancias se obtienen con la ecuación (4) y (5)

$$K_{11}(s) = \left. \frac{\partial y_1(s)}{\partial u_1(s)} \right|_{u_2} \quad (4)$$

$$K_{22}(s) = \left. \frac{\partial y_2(s)}{\partial u_2(s)} \right|_{u_1} \quad (5)$$

Con las ecuaciones (4) y (5) se forma la llamada matriz de ganancias relativas y por medio de ella obtener una descripción de las variables controladas y manipuladas como se observa en la ecuación (6).

$$\lambda_{ij} = \frac{\left. \frac{\partial y_i(s)}{\partial u_j(s)} \right|_{u_{k,k \neq j}}}{\left. \frac{\partial y_i(s)}{\partial u_j(s)} \right|_{y_{k,k \neq i}}} = \frac{\lim_{s \rightarrow 0} G_{\dot{y}} | \text{ todos los lazos abiertos}}{\lim_{s \rightarrow 0} G_{\dot{y}} | \text{ resto de lazos cerrados}} \quad (6)$$

$$= \left(\frac{K_{ij}|_{k,k \neq j}}{K_{ij}|_{k,k \neq i}} \right)$$

Luego para un sistema 2x2 la matriz de ganancias relativas 2x2 viene dada por las ecuaciones (7) y (8).

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \quad (7)$$

³² Alarcón, M. A. (2009). *Diseño de un sistema de control multivariable para un circuito de molienda en húmedo*, p 21.



$$\lambda_{22} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \quad (8)$$

Con las ecuaciones (7) y (8) se concluye que la suma de cualquier elemento de cualquier columna o cualquier fila es igual a uno. Finalmente se agrupan los elementos λ_{ij} y se construye la Matriz de Ganancias Relativas (Relative Gain Array-RGA). Como se observa en la ecuación (9).

$$\Lambda = K \times (K^{-1})^T \quad (9)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix}$$

De manera general para un sistema de N entradas y N salidas, existen (NxN) elementos de ganancia relativa entre la salida y la entrada esos elementos están dados por la ecuación (10).

$$\lambda_{ij} = \frac{K_{ij}|_u}{K_{ij}|_y} = \frac{\frac{\Delta y_i}{\Delta u_j}|_u}{\frac{\Delta y_i}{\Delta u_j}|_y} \quad (10)$$

Donde los subíndices 'y' y 'u' denotan los valores constantes respectivamente y la matriz de ganancias relativas para el sistema de NxN se observa en la ecuación (11).

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \dots & \lambda_{1N} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \dots & \lambda_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{N1} & \lambda_{N2} & \dots & \lambda_{NN} \end{bmatrix} \quad (11)$$

El cálculo de los parámetros de la matriz de ganancias relativas puede parecer complicado y tedioso, en la práctica no es ese el caso ya que los elementos de la matriz tienen las siguientes propiedades:



- I. La suma de todos los elementos de cada columna es igual a uno, como se observa en la ecuación (12).

$$\sum_{i=1}^N \lambda_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

- II. La suma de todos los elementos de cada fila es igual a uno, como se observa en la ecuación (13).

$$\sum_{i=1}^N \lambda_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

Eso implica que para un sistema de (2x2) solo un elemento deberá ser calculado (λ_{11}), como se observa en la ecuación (14).

$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{11} \quad \lambda_{21} = \lambda_{12} \quad \lambda_{22} = \lambda_{11} \quad (14)$$

De la misma manera en un sistema de NxN solo (N-1)*(N-1) elementos deberán ser calculados. El método presentado anteriormente es un método experimental. Si se conoce un modelo del sistema es posible calcular la matriz de ganancias relativas de manera analítica. Si se toma el modelo de estado estacionario descrito por las ecuaciones (15) y (16).

$$y_1 = K_{11}u_1 + K_{12}u_2 \quad (15)$$

$$y_2 = K_{21}u_1 + K_{22}u_2 \quad (16)$$

Donde K son las ganancias de estado estable de la matriz de la función de transferencia del sistema. Entonces se tiene la ecuación (17).

$$K_{11}|_{u_2} = \frac{\partial y_1|_{u_1}}{\partial u_1|_{u_2}} = K_{11} \quad (17)$$



Al eliminar u_2 de las relaciones de estado estable, se obtiene la ecuación (18).

$$y_1 = K_{11}u_1 + \frac{K_{12}(y_2 - K_{21}u_1)}{K_{22}} \quad (18)$$

Al derivar con respecto a u_1 y manteniendo constante y_2 se obtiene la ecuación (19).

$$K_{11}|_{y_2} = \left. \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \right|_{y_2} = K_{11} + \frac{K_{12}K_{22}K_{21}}{K_{22}} \quad (19)$$

La ganancia relativa λ_{11} está dada por la ecuación 20.

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11}|_{u_2}}{K_{11}|_{y_2}} = \frac{1}{1 - \frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}}} \quad (20)$$

Las demás ganancias relativas se pueden calcular de manera similar. ³³

- Valores singulares

La descomposición en valores singulares aporta una gran información sobre la direccionalidad y las ganancias de la planta para una frecuencia dada. (Recio, 2005) plantea los cálculos "Dada una matriz real $m \times n$ A , existen matrices ortogonales U (de orden m) y V (de orden n) y una matriz diagonal Σ (de tamaño $m \times n$) tales que se represente como en la ecuación (21).

$$A = U \Sigma V^T \quad (21)$$

Los r (con $r \leq m, n$) elementos diagonales no nulos de Σ son los valores singulares de A (es decir las raíces cuadradas positivas de los valores propios de $A^T A$). Si hay r valores singulares (no nulos) entonces r es el rango de A . Supondremos en lo que

³³ Fuentes, J. I. (2003). *Análisis y diseño de un sistema de control multivariable para el dispositivo "Twin Rotor MIMO System"*.



sigue que los r valores singulares en la diagonal de Σ aparecen en orden descendente, es decir $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r$. si bien debe quedar claro que el procedimiento empleado en esa construcción “teórica” de la SVD no es en modo alguno la base para los algoritmos desarrollados para su cálculo efectivo. El cálculo de la SVD permite escribir A como suma de r matrices de rango uno, como se observa en la ecuación (22).

$$A = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \dots + \sigma_r u_r v_r^T \quad (22)$$

Donde $u_1, \dots, u_r$ y $v_1, \dots, v_r$ son las r primeras columnas de las matrices U y V , respectivamente.

- Número de condición

Permite medir cuan sensible resulta una variable a cambios o errores en el valor de entrada y de salida. Se puede encontrar que el número de condición de una matriz G se define como el cociente entre los valores singulares máximo y mínimo³⁴. Como se observa en la ecuación (23).

$$\gamma G = \sigma_{\max} G \sigma_{\min}^{-1} \quad (23)$$

La condición se determina como se observa en la ecuación (24).

$$\text{Cond}(A) = \|A\| \|A^{-1}\| \quad (24)$$

Donde $\|A\|$ indica alguna norma matricial de C . Además de considerar que $1 \leq \text{cond}(A) < \infty$. Y el número de dicha condición se interpreta en base a la ecuación (25).

$$\frac{1}{\text{Cond}(A)} = \min \left\{ \frac{\|A - B\|}{\|A\|} \mid B \text{ no es inversible} \right\} \quad (25)$$

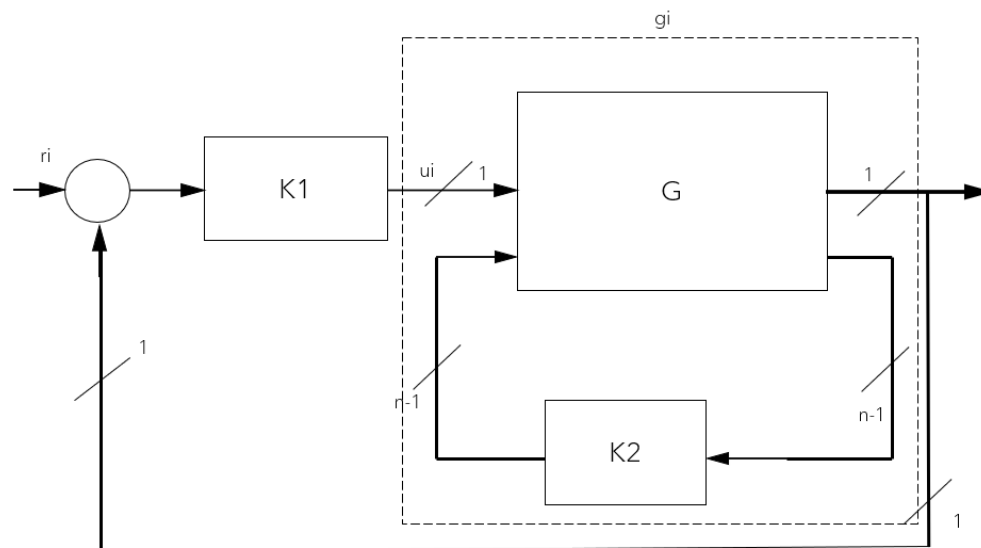
³⁴ Jurado, J. G. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*, p 21.

Es decir, que en recíproco del número de condición de A es igual a la distancia relativa de A a la matriz B no invertible más cercana (Pérez, 2000)³⁵.

- Descomposición estructural

(Fariñas, 2006) define que “En el esquema de descomposición estructural se denomina K1 al controlador que cierra el lazo entre la salida i y la entrada i. Al conjunto de n-1 controladores cuyos lazos ya están cerrados se las denomina K 2. De esta forma, la matriz de controladores se puede poner como”³⁶. En la figura 8 tenemos la descomposición estructural.

Figura 8. Descomposición estructural.



K se observa en la ecuación (26).

$$K = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K \end{pmatrix} \quad (26)$$

Se denomina g_{ii} al elemento (i, i) del proceso, y cuyo lazo de realimentación no está aún cerrado. Al resto de elementos de su misma fila en la matriz de funciones de transferencia del proceso se le denomina G_{12} . Al resto de elementos de la misma

³⁵ Pérez, J. L. (2000). Número de condición y determinante de una matriz, p 29-34

³⁶ Fariñas, L. Á. (2006). Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables.



columna que g_{ii} se le denomina G_{21} . Y al resto de elementos de G de la diagonal principal se le denomina G_{22} . De esta forma, la matriz G se puede representar como se observa en la ecuación (27).

$$G(s) = \begin{pmatrix} g_{ii}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{pmatrix} \quad (27)$$

Tal y como se muestra en la , al proceso que resulta de cerrar los $n-1$ lazos de control y que se observa desde la entrada i a la salida i se le denomina i y $g \sim$ y se obtendría matricialmente a partir de la ecuación (28).

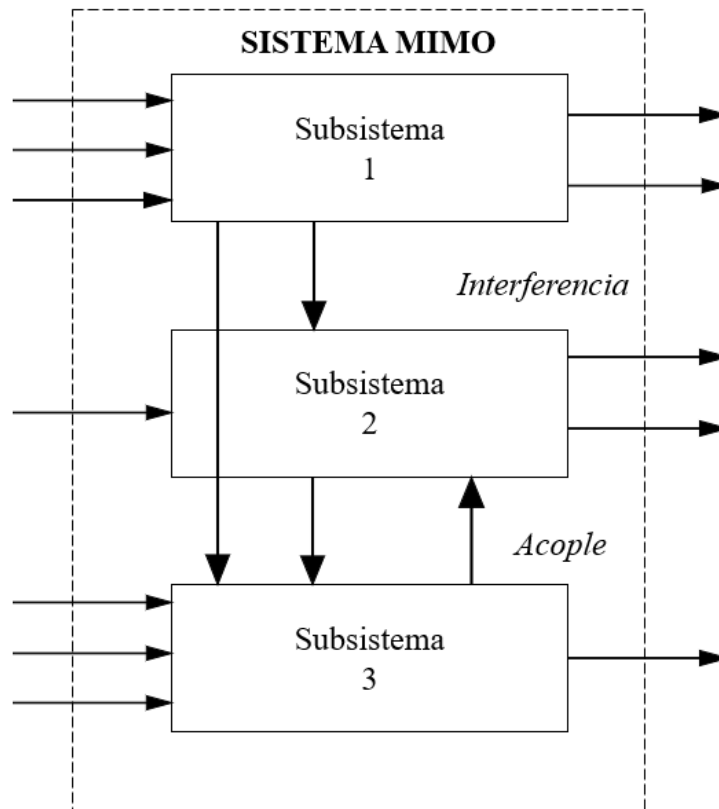
$$g(s) = g_{ii}(s) - G_{12}(s)K_2(s)(I + G_{12}K_2(s))^{-1}G_{21}(s) \quad (28)$$

Donde,

- g_{ii} : Es un elemento de la matriz G , es decir una función de transferencia SISO.
- G_{12} : Es un vector fila de funciones de transferencia de dimensión $1 \times (n-1)$.
- G_{21} : Es un vector columna de funciones de transferencia de dimensión $(n-1) \times 1$.
- K_2 : Es una matriz cuadrada diagonal de dimensión $(n-1)$ I: Es la matriz identidad de orden $n-1$.
- Desacoplamiento de sistemas multivariables

Con la intención de eliminar o reducir las interacciones entre las variables del proceso se pretende descomponer en varios sistemas mono variable por medio del desacoplamiento donde se elimine el acoplamiento de las variables deseadas y las salidas. En la figura 9 podemos ver un sistema MIMO compuesto por varios subsistemas.

Figura 9. Representación de un sistema mimo descompuesto en un conjunto de sistemas acoplados.



Fuente: (Garrán, 2009).

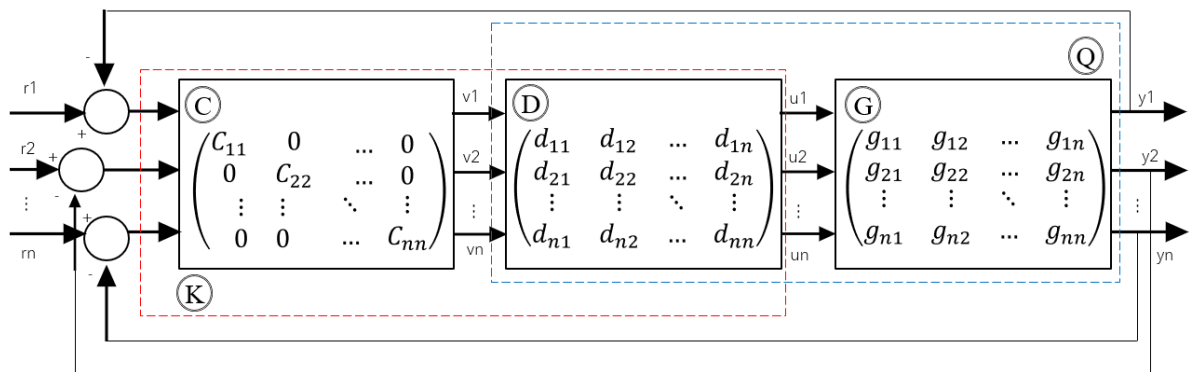
(Prato, Coronel Méndez , & Rojas Sulbaran, 2017) plantean que “El desempeño del desacoplamiento depende de algunas características del sistema como no linealidades, elevados tiempos muertos, entre otras, que en algunos casos no permiten la implementación del mismo. Algunas veces se emplean técnicas de desacoplamiento que consideran los valores de estado estacionario basándose en la ganancia estática, despreciando el efecto de las características dinámicas”³⁷.

(Koppel & Segal, 2004) al realizar su trabajo del Análisis de Estrategias de Desacoplamiento en Sistemas Interactuantes de Control de Procesos encuentran que el uso de des acopladores presenta limitaciones en “Que un sistema de control por modelo, lo que requiere el conocimiento del mismo y, dado que los parámetros pueden variar con el tiempo, será necesario un sistema de identificación en línea de los parámetros o bien realizar la actualización periódicamente; así como también

³⁷ Prato, R. O., Coronel Méndez , M., & Rojas Sulbaran, R. (2017). *Efecto de las técnicas de desacoplamiento en sistemas multivariados*, 471-90.

requiere la inversión de funciones, lo que limita la aplicación a los sistemas invertibles; cuando no es posible, por ejemplo cuando existen retardos puros como en el caso de destilación, deben usarse aproximaciones con las consiguientes restricciones en cuanto a validez”³⁸. En la figura 10 observamos el diagrama de bloques de un sistema MIMO con red de desacoplamiento controlador descentralizado.

Figura 10. Sistema de control combinando red de desacoplamiento y controlador descentralizado.



Fuente: (Jurado, 2012) p 23.

2.2.2.6 Métodos de desacoplo o compensación

Se buscan romper con la interacción de las variables y tener el control de manera independiente de los lazos. (Jurado, 2012) plantea³⁹.

“Supóngase un sistema 2×2 en el que la RGA indica que existen problemas de interacción severa. Si uno de los lazos se desconecta, la interacción desaparece. Como alternativa se puede sintonizar muy suavemente de forma que esté casi en manual, por ejemplo, reduciendo las ganancias proporcionales, es decir desintonizar. Sin embargo, un ajuste suave producirá un mal rendimiento que puede no ser tolerable desde un punto de vista económico. Por lo tanto, este sistema de desacoplo no tiene interés práctico”.

Otros autores han optado por utilizar el concepto de dominancia diagonal y plantean la compensación multivariable como un paso para conseguir la dominancia diagonal

³⁸ Koppel, V., & Segal, M. (2004). *Análisis de Estrategias de Desacoplamiento en Sistemas Interactuantes de Control de Procesos*, p 1-7.

³⁹ Jurado, J. G. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*, p 25.

de $Q(s)$, esto es, del conjunto formado por el compensador $D(s)$ y el proceso $G(s)$. La medida más característica de la dominancia por columna de un proceso $n \times n$ son las n respuestas en frecuencia obtenidas como se observa en la ecuación (29).

$$\frac{\sum_{i=1, i \neq j}^n |q_{ij}(j\omega)|}{q_{ij}(j\omega)} \quad (29)$$

A partir de las cuales se afirma que un proceso es dominante si todas las respuestas están por debajo de los 0 dB, y el grado de dominancia es mayor cuanto menor sean los valores de estas respuestas. Las bandas de Gersghorin pueden servir para analizar la dominancia diagonal de un proceso. Es normal que la compensación dinámica por dominancia diagonal se formule como un problema de optimización en donde se intenta diagonalizar el sistema a varias frecuencias. Concretamente, se define como el problema de encontrar los elementos $d_{ij}(s)$ del compensador $D(s)$ tal que todas las funciones escalares de dominancia por columna del conjunto formado por el compensador y el proceso, definidas por la ecuación (30), alcancen el mínimo valor posible.

$$J_j = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \sum_{i=1, i \neq j}^n |q_{ij}(j\omega)|}{\sum_{k=1}^N P_k |q_{ij}(j\omega)|} \quad (30)$$

Otra posibilidad de obtención de desacoplo, consiste en aprovechar las propiedades ortonormales de las matrices U y V de la descomposición en valores singulares.

- Desacoplo lineal

(Jurado, 2012) ⁴⁰ plantea el desacoplo con la matriz que se observa en la ecuación (31).

$$G(s) \cdot D(s) = Q(s) = \begin{pmatrix} q_1(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_2(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q_n(s) \end{pmatrix} \quad (31)$$

⁴⁰ Jurado, J. G. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*, p 27.



- Desacoplador tradicional

El desempeño del desacoplamiento depende de algunas características del sistema como no linealidades los desacopladores según (Prato, Coronel Méndez , & Rojas Sulbaran, 2017) tradicionalmente se basa en modelos que describen la respuesta transitoria y permanente del sistema multivariable. La matriz de función de transferencia de un proceso multivariable 2x2 para un modelo de primer orden más tiempo muerto (POMTM) puede ser descrita como se observa en la ecuación (32).

$$G(s) = \frac{C(s)}{M(s)} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{\tau_{11}s + 1} e^{-t_{011}s} & \frac{K_{12}}{\tau_{12}s + 1} e^{-t_{012}s} \\ \frac{K_{21}}{\tau_{21}s + 1} e^{-t_{021}s} & \frac{K_{22}}{\tau_{22}s + 1} e^{-t_{022}s} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$= \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

Donde K representa las ganancias estáticas, T_{ij} las constantes de tiempo y t_{0ij} el tiempo muerto. Usando la ecuación (32), se calcula el bloque $D(s)$ tal que se obtiene la ecuación (33).

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Donde, D_{12} se dan como se observa en la ecuación (34) y D_{21} como se observa en la ecuación (35).

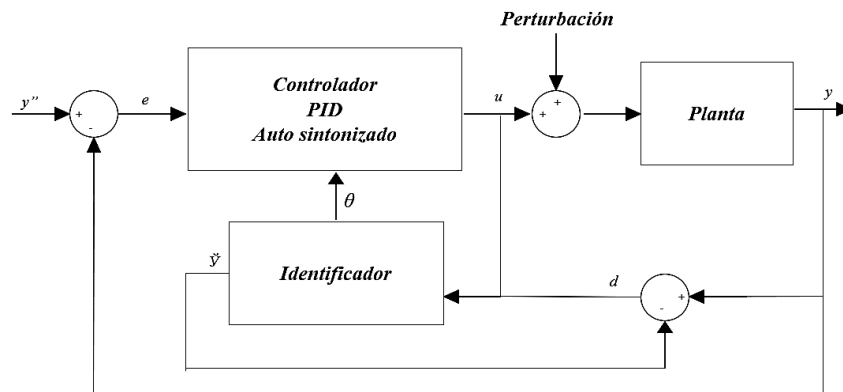
$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (34)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (35)$$

2.2.2.7 Controlador PID Auto sintonizado

Esta técnica se puede usar de manera aplicativa a un sistema MIMO permitiendo regular las variables de un proceso en general de manera que se pueda estimar a dinámica del sistema (Mejía Giraldo, Bolaños, & Correa, 2007) presentan el esquema básico para que este sistema funcione de manera auto sintonizado⁴¹. La figura 11 representa el diagrama de bloques de una planta con un controlador PID auto sintonizado.

Figura 11. Sistema PID auto sintonizado.



Fuente: (Mejía Giraldo, Bolaños, & Correa, 2007), p 2.

La función de transferencia del Controlador PID auto sintonizado, es dada como se observa en la ecuación (36).

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{n_2 z + n_1 z + n_0}{z^2 - z} \quad (36)$$

2.2.3 Lógica difusa

La lógica difusa fue planteada por Zadeh en 1965. Constituye una generalización de la lógica clásica, que es determinista: “verdadero” o “falso”. Sin embargo, la fuzzy logic, a diferencia de la lógica clásica, tiene fronteras imprecisas. De acuerdo a Zadeh, un conjunto difuso es una clase de objetos con un contínuum que muestra

⁴¹ Mejía Giraldo, D., Bolaños, R. A., & Correa, C. A. (2007). *Técnicas de control adaptativas aplicadas a sistemas multivariados (M.I.M.O.)*, p 37-42.



su grado de membresía de ese conjunto. En efecto, cada miembro del conjunto está caracterizado por una función de membresía, la cual va desde cero hasta a uno.

Cuando no existe un modelo matemático con al que se pueda expresar de forma precisa se expresa de una manera que no es ni totalmente cierta ni totalmente falsa, general se basa en lo relativo de lo observado como posición diferencial. (García, Felix Benjamin, & Bello Pérez, 2014) afirman que “La lógica difusa se ha comenzado a considerar como un elemento clave en el estudio de la realidad social, un contexto impregnado permanentemente de borrosidad como casi todo en las ciencias humanas. la lógica difusa es, paralelamente, una estrategia para abordar los problemas de incertidumbre”⁴²

2.2.3.1 Reglas difusas

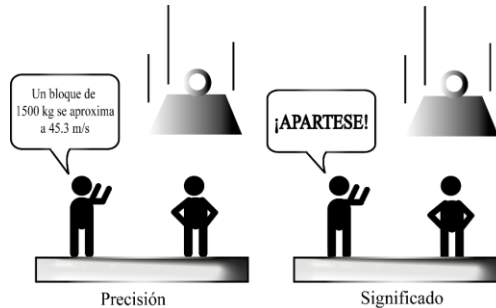
(Matute & Bernal Suárez, 2017) señalan “las reglas difusas como una expresión lingüística que refleja causa y efecto Si X pertenece a A, entonces Y pertenece a B Donde X y Y, son elementos; y, A y B, conjuntos difusos. En la figura 12 se observa un ejemplo de una persona va a ser golpeada por un objeto pesado, existen dos maneras de dar a conocer su estado mediante la precisión que es dar a conocer todos los factores de lo que sucede en su entorno y la otra seria su significado que es concepto no tan detallado que lo describe de manera imprecisa lo que se está midiendo. Unos ejemplos de reglas difusas pueden ser:

- Si la temperatura es FRÍA, entonces el flujo de combustible es ALTO.
- Si el ciclo de trabajo es GRANDE, entonces la tensión es ALTA.
- Si la velocidad es ALTA, entonces la frena-da es FUERTE.”⁴³.

⁴² García, R. E., Felix Benjamin, G., & Bello Pérez, R. (2014). *Evaluación de impacto del entrenamiento con lógica difusa*, p 42.

⁴³ Matute, A., & Bernal Suárez, W. (2017). *Técnicas de Lógicas Difusa en Ingeniería de Control*, p 126.

Figura 12. Precisión vs. Significado.

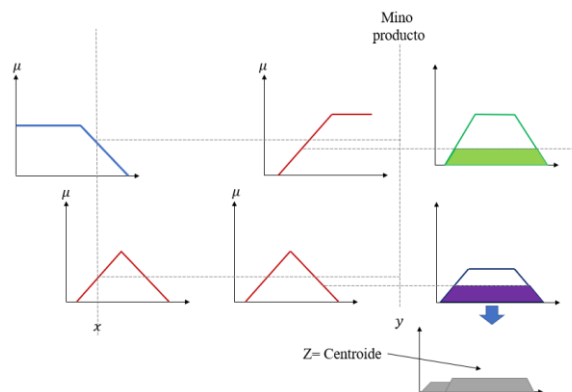


Fuente: (Matute & Bernal Suárez, 2017).

2.2.3.2 Sistemas de inferencia difusa

Son una forma de representar conocimientos y datos inexactos en forma similar a como lo hace el pensamiento humano. calculando los valores de la verdad para cada una de las entradas con una intersección de 2 o más conjuntos mediante operadores llamados T-norma o T-conorma. Finalmente, se realiza la llamada defucificación para obtener un valor concreto a la salida⁴⁴. En las figuras 13,14 y 15 se muestran diferentes sistemas de inferencia y como sería su respectivo valor defucificado.

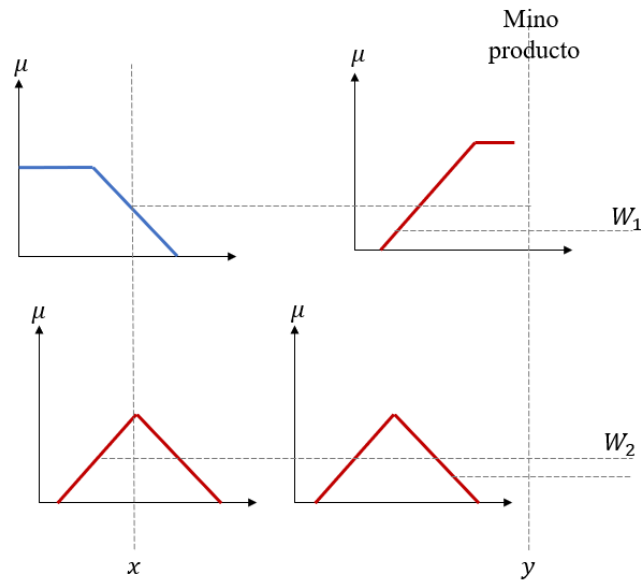
Figura 13. Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani.



Fuente: (Matute & Bernal Suárez, 2017).

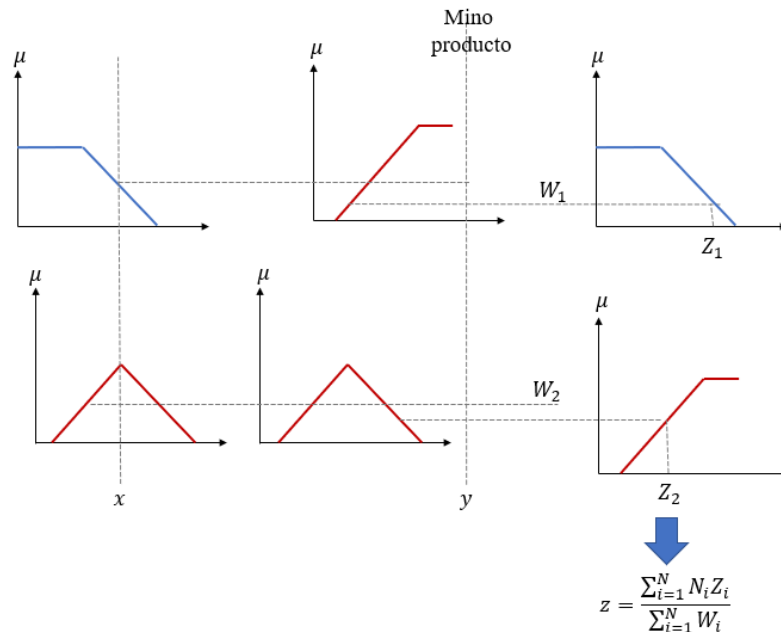
⁴⁴ Matute, A., & Bernal Suárez, W. (2017). *Técnicas de Lógicas Difusa en Ingeniería de Control*, p 127.

Figura 14. Sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno.



Fuente: (Matute & Bernal Suárez, 2017).

Figura 15. Sistema de inferencia difusa tipo Tsukamoto.



Fuente: (Matute & Bernal Suárez, 2017).



2.2.3.3 Fuente de incertidumbre

La incertidumbre en la medición puede verse influida por muchos factores diferentes que pueden influir en mayor o menor grado. En términos generales (D'Negri & De Vito, 2006), plantean que la fuente de incertidumbre deriva de tres áreas:

- Las deficiencias de la información (incompleta, errónea. Imprecisa).
- Las características propias del mundo real (no determinista: mismas causas producen efectos diferentes en distintas personas.
- Las deficiencias de los modelos que intentan explicarlo (incompleto, inexacto)⁴⁵.

2.2.3.4 Conjuntos difusos

La función característica de estos conjuntos puede tener infinitos valores. Los Conjuntos Difusos se pueden operar entre sí del mismo modo que los conjuntos clásicos. Puesto que los primeros son una generalización de los segundos. (Morcillo, s.f.) afirma que “Un conjunto difuso es pues una correspondencia (o función) que a cada elemento del universo le asocia su grado de pertenencia”⁴⁶

En conjuntos difusos, la ambigüedad existente en expresiones lingüísticas se expresa en el concepto de grado de membresía. En un conjunto difuso se generaliza el concepto de membresía, permitiendo grados de pertenencia. De esta manera (Guzmán & Castaño, 2006) definen de esta manera, al igual como razonamos los humanos podemos incluir en los conjuntos conceptos como: “está poco menos que caliente” o “está demasiado frío” o “está medio tibio”, etc.⁴⁷

Figura 16. Clasificación de temperaturas.

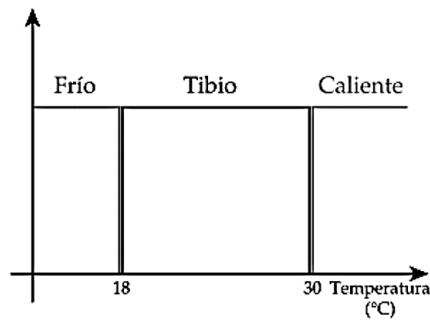
$$T(^{\circ}C) \begin{cases} \text{Frío} & T \leq 18 \\ \text{Tibio} & 18 < T < 30 \\ \text{Caliente} & T \geq 30 \end{cases}$$

⁴⁵ D'Negri, C. E., & De Vito, E. L. (2006). *Introducción al razonamiento: lógica difusa*, p 128.

⁴⁶ Morcillo, C. G. (s.f.). *Técnicas Delaware computación blanda*, p 3.

⁴⁷ Guzmán, D., & Castaño, V. M. (2006). *La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro*, p 87-107.





Fuente: (Guzmán & Castaño, 2006).

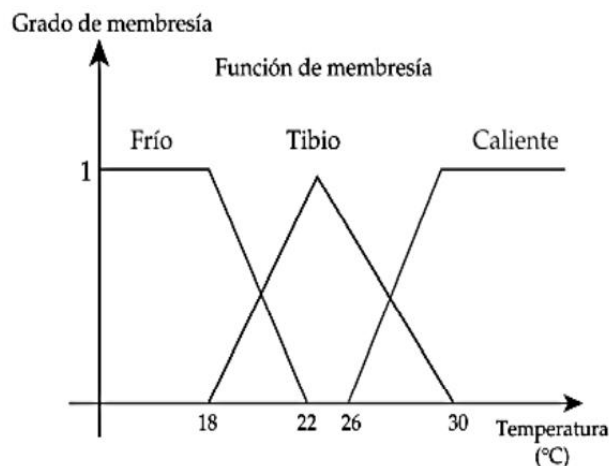
En la Figura 16 se pueden apreciar los siguientes elementos:

- El eje Y es el grado de membresía, que describe cuantitativamente la función de membresía.
- El eje X es la temperatura.
- El nombre asociado (caliente, tibio y frío) es llamado significancia lingüística y describe cualitativamente la función de membresía.

La forma de la función de membresía se debe elegir de acuerdo al problema que se desea resolver. Existen muchas formas diferentes entre ellas: triangular, gaussiana, trapezoidal, sigmoïdal, etc.

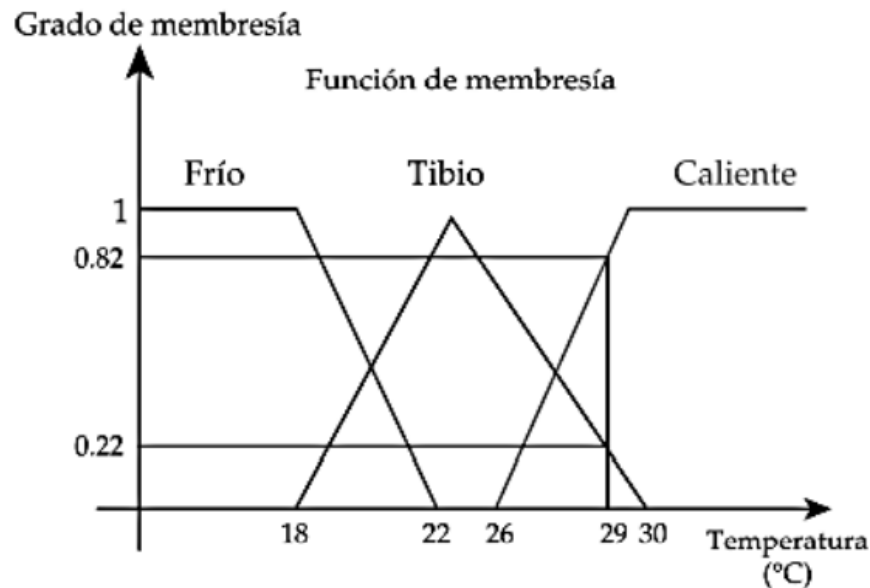
Se puede observar que para una medición de temperatura, por ejemplo de 29°C, se le asocia un grado de membresía tanto en CALIENTE como en TIBIO, en la figura 18 podemos ver este grado.

Figura 17. Funciones de membresía para temperaturas



Fuente: (Guzmán & Castaño, 2006).

Figura 18. Grados de pertenencia de $T=29^{\circ}\text{C}$.



Fuente: (Guzmán & Castaño, 2006)

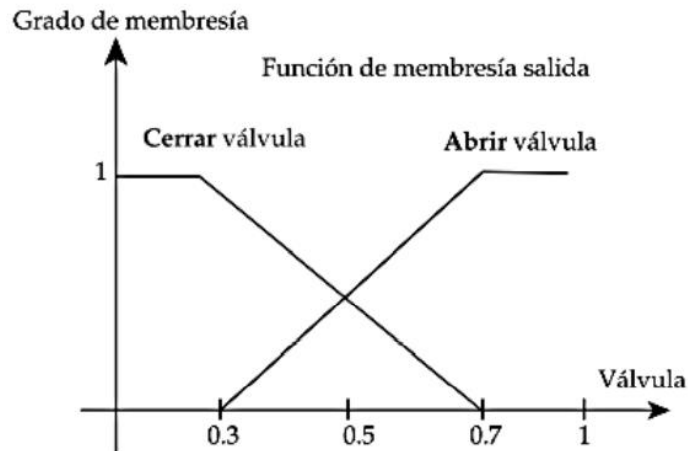
Se muestra en la Figura 17 lo que puede interpretarse como: 29°C es una temperatura mucho más que tibia o 29°C es prácticamente caliente, en la figura 18 podemos que este valor se intercepta con estos grupos. El grado de membresía asociado dependiendo de la función de membresía, es llamado grado de pertenencia (GP) y se representa de la siguiente manera:

- $\text{GP}(29^{\circ}\text{C}, \text{CALIENTE}) = 0,82$
- $\text{GP}(29^{\circ}\text{C}, \text{TIBIO}) = 0,22$
- $\text{GP}(29^{\circ}\text{C}, \text{FRÍO}) = 0$

A partir de la información de las gráficas (Guzmán & Castaño, 2006) ⁴⁸explican que de acuerdo a la información plasmada se puede tomar la decisión si abrir más o cerrar la válvula para obtener la temperatura adecuada esa decisión se le conoce como inferencia. En la figura 19 tenemos las funciones de membresía que dependiendo de las reglas y los grados de pertenencia de los conjuntos en la defucificación podremos saber cuánto debemos abrir o cerrar la válvula.

⁴⁸ Guzmán, D., & Castaño, V. M. (2006). *La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro*.

Figura 19. Función de membresía de salida.

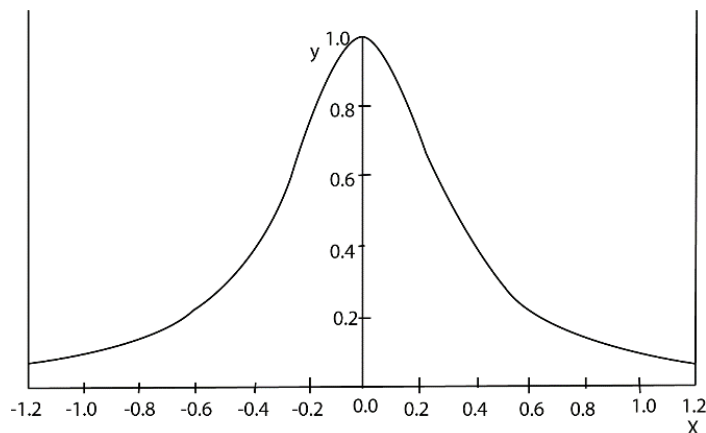


Fuente: (Guzmán & Castaño, 2006)

2.2.3.5 Conjuntos borrosos

Son aquéllos cuyos elementos no tienen por qué pertenecer o no pertenecer, sino que pertenecen según un cierto grado entre 0 y 1. (Benavidez & Vacca González, s.f.) presentan la Figura 20.

Figura 20. Función de pertenencia "Valores cercanos a cero".



Fuente: (Benavidez & Vacca González, s.f.)

Se puede observar que, para una medición de temperatura, por ejemplo 29 °C, se le asocia un grado de membresía tanto en CALIENTE como en TIBIO.

2.2.3.6 Tratamiento de la Incertidumbre

(Morcillo, s.f.)“explica el principal problema de esta aproximación fue el crecimiento exponencial de las probabilidades necesarias para calcular la distribución conjunta de probabilidad cuando el número de variables aumentaba”⁴⁹. De esta forma, surgieron otras aproximaciones entre las que cabe destacar:

- Métodos No Numéricos

Aproximaciones cualitativas siendo válida hasta que se encuentre una razón para pensar lo contrario.

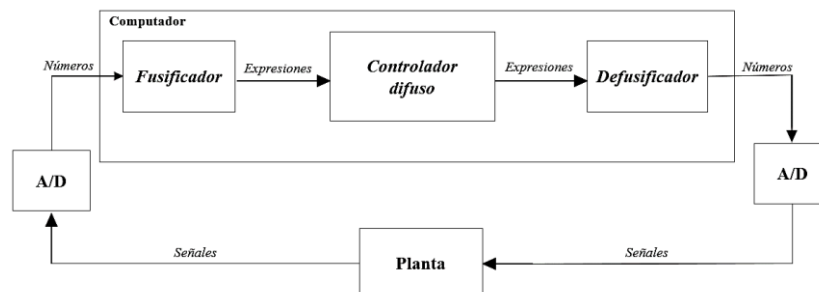
- Métodos Numéricos

Es posible formular problemas matemáticos de tal forma que puedan resolverse usando operaciones aritméticas.

2.2.4 Sistemas de control difuso

En los sistemas de control difuso se busca el uso de estrategias de control a través del sentido común en lugar de números, para ellos se hace una adaptación previa al estado de las variables ya que estas no se pueden medir con lógica. A esta etapa (R & Musalem, s.f.)definen como etapa de fusificación representada en la figura 21.

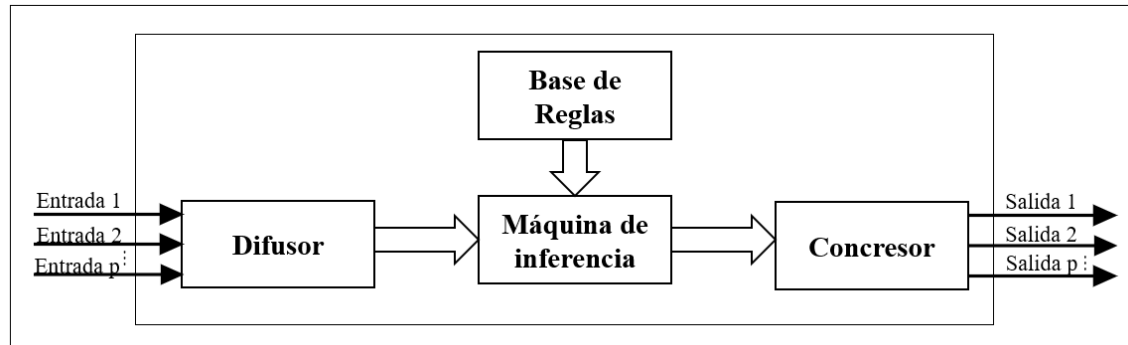
Figura 21. Lazo de control difuso.



⁴⁹ Morcillo, C. G. (s.f.). *Técnicas Delaware computación blanda*, p 7.

(Cruz, 2010) afirma que “Un controlador difuso está compuesto de cuatro partes principales: interfaz de defusificación, base de conocimientos, lógica de decisiones e interfaz de defusificación”, las cuales se observan en la Figura 22.

Figura 22. Estructura de un controlador difuso



2.2.4.1 Interfaz de defusificación

Dentro de las herramientas de defusificación que existen ellas son derivadas de primera que fue planteada por Mamdani por ello (Cruz, 2010), afirma. Mide los valores de las variables de entrada para realizar un mapeo a escala que transfiere el rango de valores de las variables a un universo de discurso difuso. La defusificación convierte los datos de entrada en valores lingüísticos que son las etiquetas de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos”⁵⁰.

2.2.4.2 Aplicaciones de controladores difusos

Los controladores difusos, hoy en día, ocupan un lugar importante dentro de la industria, considerando este punto, es preciso continuar la investigación para el desarrollo y mejora de nuevas acciones de control por lógica difusa.

(Bonilla, Grisales , & Melgarejo, 2006) diseñan e implementan un controlador difuso basado en FPGA. “El proceso de integración inicia con un estudio de los problemas de cuantificación y truncamiento al ser el controlador un sistema digital con longitud de palabra finita; se establece un modelo adecuado para su implementación en hardware, dicho modelo se especifica en VHDL para ser sintetizado e implementado en una FPGA empleando herramientas de trabajo en Lógica programable. Por último, se han desarrollado una serie de aplicaciones complementarias en MATLAB,

⁵⁰ Cruz, P. P. (2010). *Inteligencia co aplicaciones a la ingeniería*.



de esta forma el controlador puede ser configurado y sintonizado bajo Simulink ; Estableciéndose una plataforma completa en lógica difusa que permite realizar un trabajo de diseño Off –Line, llevarlo hacia un dispositivo digital , en donde previo a su funcionamiento en campo , es posible sintonizarlo empleando emulación” ⁵¹.

Otra aplicación que podemos encontrar es el diseño realizado por García que es aplicado a la industria de alimentos , diseñando: “ una estrategia de control mediante la combinación de técnicas de control clásico y lógica difusa, para llevar a cabo el acoplamiento de los lazos de control de flujo y temperatura de un proceso de congelación de pescado (churrascos de atún) que utiliza un equipo de congelación criogénico de aspersión con inyección de nitrógeno líquido dentro de un túnel de alimentación continua. Se propone un controlador PID (Proporcional + Integral + Derivativo) para la velocidad de giro del rodillo de la banda transportadora del alimento y un controlador fuzzy del tipo Takagi-Sugeno que fija el valor de consigna del controlador PI (Proporcional + Integral) usado para regular la temperatura en el túnel de congelamiento (Rafael J. García et al., 2016).

⁵¹ Bonilla, J. E., Grisales , V. H., & Melgarejo, M. (2006). *Diseño e implementación de un controlador difuso basado en FPGA*.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



3. METODOLOGÍA

3.1 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Para el presente estudio dicho nivel es exploratorio, el cual según (Enciso, 2013)⁵² tiene como propósito examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, sí se desea abordar dicho problema desde nuevas perspectivas. Lo anterior con el fin de ahondar en nuevos conocimientos y preparar el terreno para posteriores investigaciones.

3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según el tipo de investigación, el presente estudio reúne condiciones metodológicas de una investigación aplicada, la cual según (Lima, 2008)⁵³ se centra en la búsqueda del progreso científico considerando las posibilidades que entregan los conocimientos obtenidos de ella, para hacer, para actuar, para construir y para modificar.

3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según (Francisco, 2015)⁵⁴ “un diseño constituye una organización esquemática de la investigación”, el cual es un modelo que establece como se va a desarrollar la actividad en el proceso de la investigación. La presente investigación se basa en un diseño experimental, del tipo cuasi experimental, donde el investigador manipula la realidad, pero en general en situaciones las cuales es difícil un control experimental riguroso, ya que se desarrolla una estrategia de control que surge de una investigación exploratoria y los resultados experimentales están sujetos a los estudios previos. Diseño el cual se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, donde los resultados se miden bajo resultados cuantificables, lo que implica la necesidad de utilizar un instrumento o técnica que sea válida y confiable.

⁵² Enciso, G. A. (2013). *El proceso de investigación*, p 1-12.

⁵³ Lima, J. B. (2008). *Técnicas y métodos de investigación*.

⁵⁴ Francisco, R. (2015). *Tipo, niveles y diseños de investigación*, p 4.





3.4 POBLACIÓN – MUESTRA

La población está compuesta por las estrategias de control multivariable MIMO y la muestra se compone por la estrategia que se fundamenta en la utilización de los sistemas de lógica difusa en la acción de dicho control.

3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La información es recolectada de bases de datos de alto impacto como Science Direct, Scopus, Web of Science e IEEE, así como también bases de datos de libre acceso como Google Académico. Se parte por recolectar investigaciones previas bajo la búsqueda “control multivariable MIMO”, de la cual se hace uso para determinar los métodos y conocimientos necesarios para desarrollar un control multivariable MIMO. Y bajo la búsqueda “control multivariable MIMO difuso”, de la cual se hace uso para desarrollar el planteamiento que permite desarrollar un control multivariable en base a sistemas difusos.

Una vez desarrollada la estrategia de control la misma es implementada y los datos para la validación son recolectados de las simulaciones haciendo uso de las herramientas que proporciona Matlab y su herramienta Simulink. Lo anterior también se realiza para recolectar los datos de la implementación de una estrategia de control multivariable MIMO clásica, para su posterior comparación con la implementación de la estrategia difusa.

3.6 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para procesar y analizar la bibliometría se hace uso de la herramienta de análisis que proporciona Scopus, la cual ofrece un estudio de la cantidad de investigaciones referentes al tema de los últimos 5 años, información de las áreas en las cuales se investiga el tema, los países, los idiomas, entre otros análisis, información la cual se proporciona tabulada estadísticamente a manera de gráficos. Con la información anterior y haciendo uso de estadísticas de muestreo se determina la cantidad de trabajos a tener en cuenta para el desarrollo de la estrategia de control multivariable MIMO difuso.

Una vez seleccionadas las investigaciones se procede a extraer la información y se desarrolla la estrategia, para posteriormente implementar la misma sobre un caso de estudio práctico. Implementada la estrategia se procede a utilizar técnicas estadísticas, haciendo uso de herramientas proporcionadas por Excel para calcular



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



desviaciones, promedios, errores, entre otros, para validar los resultados obtenidos, poniendo en perspectiva la estrategia desarrollada frente a la estrategia clásica.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



4. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA SISTEMAS MIMO BASADA EN SISTEMAS DIFUSOS

4.1 INVESTIGACIÓN DE LA ESTRATEGIA

Como se indicó en el capítulo anterior el desarrollo de la estrategia parte de una investigación exploratoria, en la cual se considera una muestra de investigaciones contenidas en un estudio de los últimos 5 años, donde para la determinación de la cantidad de estudios a tener en cuenta se hace uso de una bibliometría. Bajo la búsqueda de “control multivariable MIMO” se obtuvieron 309 investigaciones y los siguientes resultados.

En la figura 23, se presentan las investigaciones clasificadas por año y la cantidad de estas.

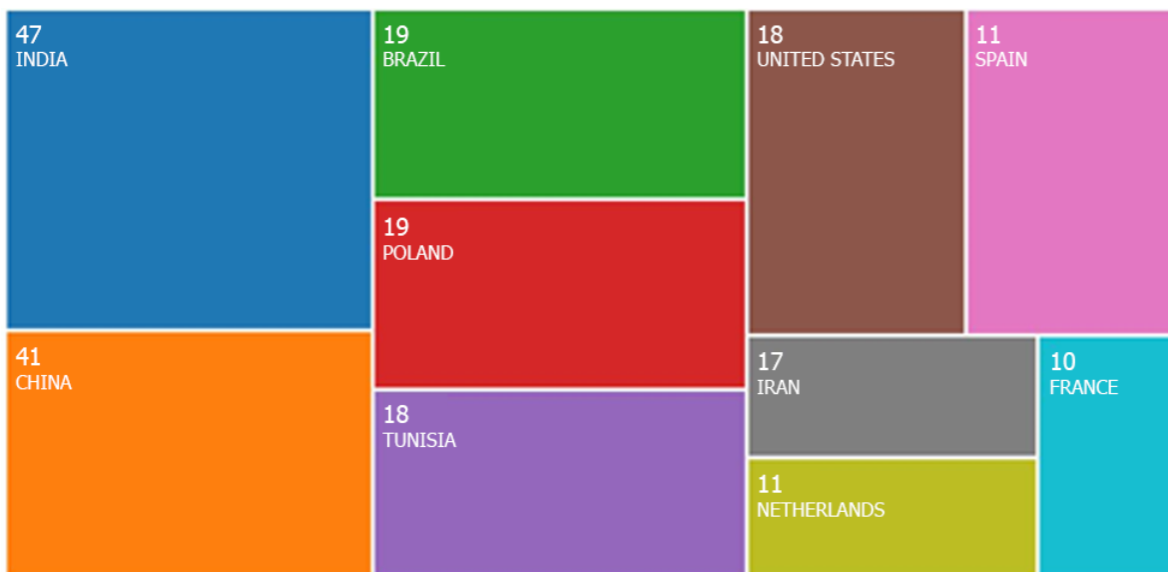
Figura 23. Investigaciones por año bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus



En la Figura 24, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por país.



Figura 24. Investigaciones por país bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus



En la Figura 25, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por área.

Figura 25. Investigaciones por área bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus



SC-CER96940



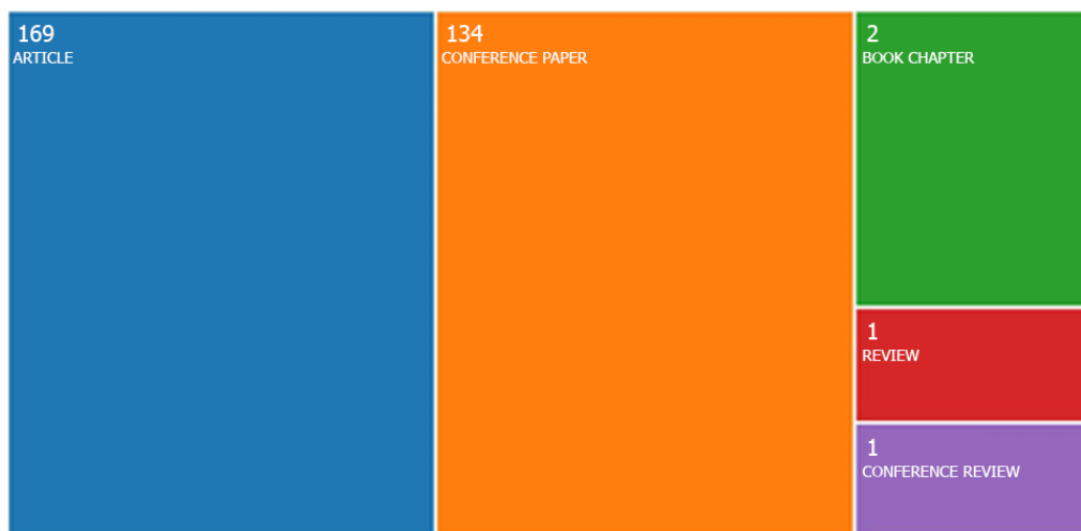
"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



En la Figura 26, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por tipo de documento.

Figura 26. Investigaciones por tipo bajo la búsqueda "control multivariable MIMO" según Scopus



Y bajo la búsqueda de "control multivariable MIMO Difuso" se obtuvieron 22 investigaciones y los siguientes resultados.

En la Figura 27, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por año.

Figura 27. Investigaciones por año bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus



SC-CER96940

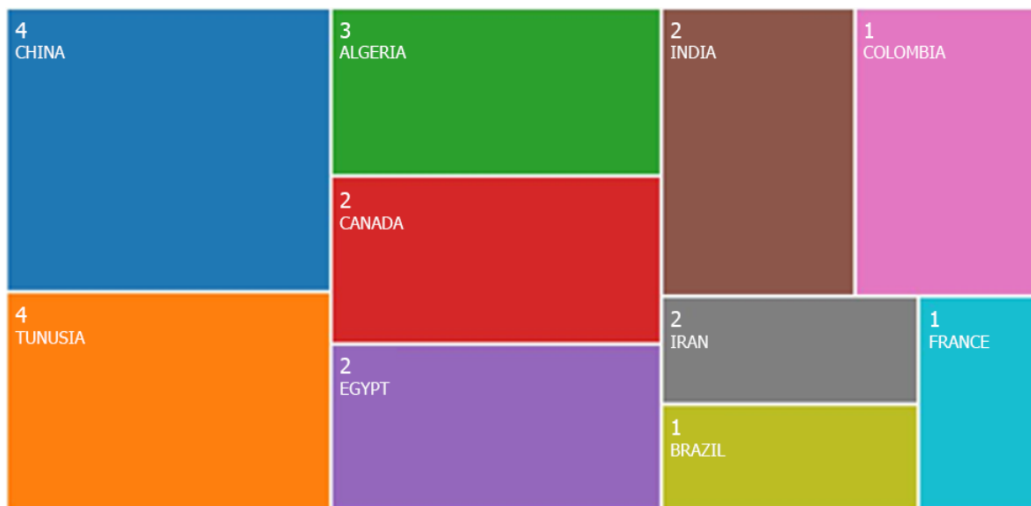


"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

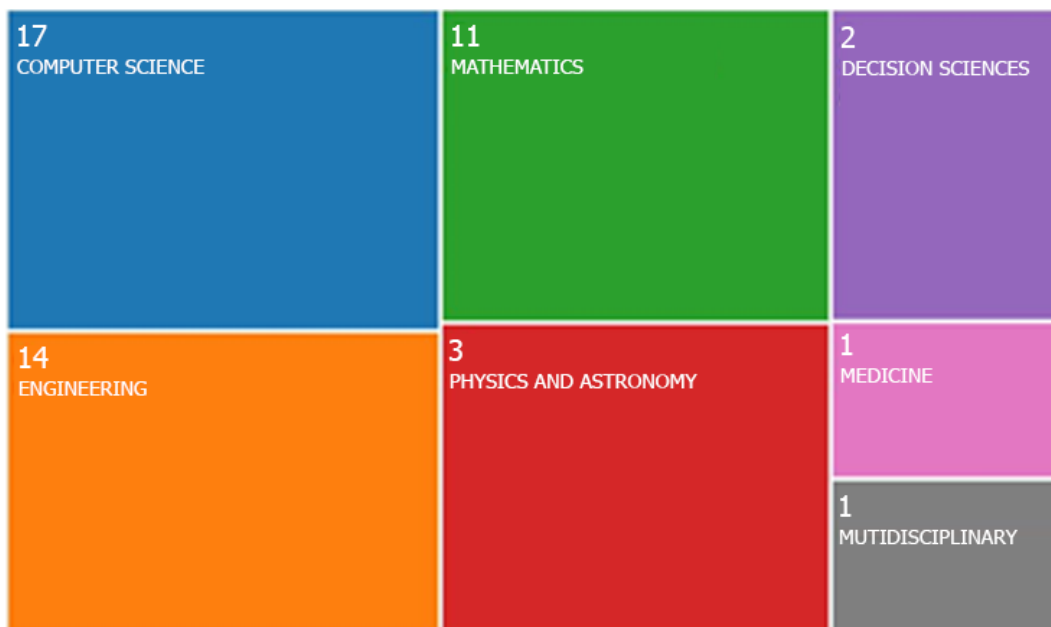
En la Figura 28, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por país.

Figura 28. Investigaciones por país bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus



En la Figura 29, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por área.

Figura 29. Investigaciones por área bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus





En la Figura 30, se presentan la clasificación de los artículos encontrados por tipo de documento.

Figura 30. Investigaciones por tipo bajo la búsqueda "control multivariable MIMO difuso" según Scopus.



Se destaca que los resultados anteriores no son calculados bajo la totalidad de investigaciones que se encuentran en la red, es una bibliometría realizada por una base de datos de alto impacto, en la cual solo se encuentran publicaciones de alto nivel científico. Por ende, el cálculo de la muestra y la estimación de su error con dicho estudio solo pretende estimar un margen de error para la presente investigación y los resultados que aquí se obtienen.

Ya que el desarrollo del control multivariable conlleva una metodología que es generalizada sin importar la técnica de control, debido a las características propias que determinan los procesos con múltiples variables, en referencia a las etapas iniciales en las cuales se hace un estudio del proceso a controlar y un tratamiento para el desacople del mismo, se tienen en cuenta las investigaciones que no consideran un control difuso. Y debido a que el fin de la estrategia a diseñar es implementar la lógica difusa, se consideran también aquellas investigaciones que incluyen dicha lógica en su proceso. Buscando extraer de ambos conceptos información que permita acoplar las estrategias ya planteadas de control multivariable con la estrategia de control difusa.



En total considerando ambas búsquedas, se tienen en la bibliometría realizada 309 investigaciones, de las cuales la muestra se calcula a partir de la ecuación (37).

$$Muestra = \frac{\frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2}}{1 + \frac{z^2 \times p(1-p)}{e^2 N}} \quad (37)$$

Donde,

- N = Tamaño de la población
- e = Margen de error (porcentaje en decimales)
- z = Puntuación z
- p = Estimado de la muestra en relación a la población total (porcentaje en decimales)

Para el intervalo de confianza dado la puntuación z se observa en la tabla 2

Tabla 2 relación nivel de confianza - puntuación z

Nivel de confianza deseado	Puntuación z
80%	1.28
85%	1.44
90%	1.65
95%	1.96
100%	2.58

Al estimar que con el 10% de las investigaciones se extraiga la información necesaria para plantear la estrategia de control, se tiene que $p = 0.1$.

Bajo un nivel de confianza deseado del 80%, se tiene que $z = 1.28$

Y al trabajar con un margen de error del 10%, se tiene que $e = 0.1$

Se procede a reemplazar en la ecuación x , se obtiene el tamaño de muestra que se observa en la ecuación 38.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



$$Muestra = \frac{\frac{1.28^2 \times 0.1(1-0.1)}{0.1^2}}{1 + \frac{1.28^2 \times 0.1(1-0.1)}{0.1^2 \times 278}} = 14 \quad (38)$$

En base a lo anterior la investigación exploratoria se realiza sobre 14 investigaciones, y los resultados obtenidos de dicha investigación según la estadística muestral posee un nivel de confianza del 80% y un margen de error del 10%, sobre los resultados que se pudieron obtener sobre la población total de 300 investigaciones.

Las 14 investigaciones que se consideraron para el desarrollo de la metodología, se condensan en la Tabla 3

Tabla 3. Investigaciones de muestra de control multivariable

Ref.	Título	Autor	Año	Ubicación	Aporte
55	Un control MIMO-PI basado en cinética multipunto de la potencia en reactores PWR	M.Zarei	2018	IRAN	Modelado cinético multipunto de un núcleo de reactor PWR. Control PI multivariable de potencia y desplazamiento axial. -Método Davison de ajuste del regulador.
56	Control continuo del modo deslizante de orden superior para una clase de sistemas no lineales MIMO inciertos: un enfoque ISS	Maria Thomas, ShyamKamal, BijnanBandyopadhyay, LeenaVachhani	2018	INDIA	En el método propuesto, se utilizan superficies deslizantes no lineales que incorporan las condiciones iniciales del sistema y las funciones exponenciales,

⁵⁵ M. Zarei, (2018) "A multi-point kinetics-based MIMO-PI control of power in PWR reactors", *Nuclear Engineering and Design*, 328. 283–91.

⁵⁶ Thomas, M., & et , a. (2018). *Continuous higher order sliding mode control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems: An ISS approach*, *European Journal of Control*. p 1–7.



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

					que garantizan la existencia del modo deslizante desde un estado inicial y se diseñan las entradas de control adecuadas
57	Control adaptativo difuso de sistemas MIMO no lineales con salidas de zona muerta desconocidas	Weihai Zhang	2018	CHINA	El algoritmo de diseño presentado no sólo garantiza que todas las señales en el sistema de bucle cerrado están limitadas de forma semiglobal uniforme en última instancia, sino que también garantiza que las salidas del sistema MIMO convergen a una pequeña vecindad de las salidas deseadas
58	Estrategia de Control Multivariable para una planta frigorífica	Liset Mayo Martí y Miguel Alejandro Botello Lemus	2018	CUBA	Consideraciones y Control por desacoplo

⁵⁷ Zhang, W., & Hang, S. (2018). *Fuzzy adaptive control of nonlinear MIMO systems with unknown dead zone outputs*. p 5690–5720

⁵⁸ Martí, L. M., & Botello Lemus, M. A. (2018). *Multivariable Control Strategy for a refrigeration plant*, ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA). p 159–65.

59	Un enfoque para diseñar controladores para plantas de orden fraccionario MIMO basado en el algoritmo de optimización de parámetros	Dingy xue	2018	CHINA	-Extiende un método de optimización de parámetros a los problemas de diseño del controlador para las plantas FO de MIMO. -La metodología se puede aplicar a plantas de orden fraccionario con o sin retrasos de tiempo. -Las pruebas de robustez muestran que el controlador es robusto para las variaciones de ganancia de la planta.
60	Diseño del control del modo deslizante para el proceso MIMO del tanque cuádruple con compensación de retardo de tiempo	D.H. Shah, D.M. Patel	2019	INDIA	-Robusta estrategia de control para el proceso MIMO de tanque cuádruple con compensación de retardo. -Los retrasos en el proceso en el sistema se compensan mediante la técnica de aproximación De Pade. -La estrategia ofrece una convergencia más rápida y un parloteo insignificante en las variables del sistema.
61	Método de diseño de controlador PI centralizado para	Sreya Ghosh Y Somnath Pan	2019	INDIA	-Diseño de controlador PI centralizado

⁵⁹ Xue, D., & Tingxue, L. (2018). *An approach to design controllers for MIMO fractional-order plants based on parameter optimization algorithm*, ISA Transactions

⁶⁰ Shah, D. H., & Patel, D. M. (2019). *Design of sliding mode control for quadruple-tank MIMO process with time delay compensation*, Journal of Process Control.

⁶¹ Ghosh, S., & Somnath, P. (2020). *Centralized PI controller design method for MIMO processes based on frequency response approximation*, ISA Transactions.

	procesos MIMO basado en la aproximación de respuesta de frecuencia				para procesos MIMO de baja y alta dimensión. -Cálculo inverso de matriz de proceso simplificado mediante la evaluación en un punto de baja frecuencia. -Procesos no cuadrados al cuadrado con pequeña ganancia considerada en los elementos diagonales que faltan.
62	Esquema de control desacoplado para el seguimiento de la salida de un sistema MIMO industrial general no lineal utilizando un esquema de rechazo de perturbaciones activas mejorado	Wameedh Riyadh Abdul-Adheem Ibrahim Kasim Ibrahim	2019	IRAK	Un análisis teórico basado en el criterio Hurwitz seguido de simulaciones numéricas sobre un sistema industrial general no lineal, incierto y altamente acoplado Multi-input Multi-Output (MIMO) demostró la validez del esquema propuesto en el control de este tipo de sistemas
63	Robusto control predictivo multivariable para procesos de deposición de polvo asistidos por láser	Cao Xiaoping	2019	EEUU	Se deriva un novedoso modelo de proceso MIMO orientado al control. A continuación, el objetivo de lograr las propiedades geométricas y térmicas

⁶² Abdul-Adheem, W. R., & Ibraheem Kasim, I. (2019). "Decoupled control scheme for output tracking of a general industrial nonlinear MIMO system using improved active disturbance rejection scheme", *Alexandria Engineering Journal*.

⁶³ Cao, X., & Beshah, A. (2019). Robust multivariable predictive control for laser-aided powder deposition processes", *Journal of the Franklin Institute*.

					deseadas se formula como uno de generar y rastrear perfiles de referencia nominales de altura de capa y temperatura de la piscina de fusión
64	Un nuevo control predictivo adaptativo de tres etapas basado en sistemas difusos: Aplicación en el control MIMO del proceso MED-TVC	Shokoufe Tayyebi, Maryam Alishiri	2019	Irán	Se presenta un nuevo esquema de control predictivo de modelo adaptativo de tres etapas basado en un enfoque difuso. En el enfoque propuesto, se desarrollan dos sistemas difusos con el fin de actualizar los horizontes y los factores de peso.
65	Robusto control de modo deslizante difuso adaptativo de la placa FGP de aleteo MIMO inlineal basada en la linealización de retroalimentación	Mousa Rezaee, Reza Jahangiri, y Rasoul Shabani	2019	Irán	Con el fin de superar el fenómeno de parloteo surge debido a las entradas discontinuas de control de modo deslizante (SMC), Se muestra que teniendo en cuenta las limitaciones de entrada física, el sistema de control AFSCM diseñado, suprime eficazmente los movimientos de agitación en presencia de las imprecisiones externas

⁶⁴ Alishiri, S. T. (2019). *A novel adaptive three stages model predictive control based on fuzzy systems: Application in MIMO controlling of MED-TVC process*, *Journal of the Franklin Institute*.

⁶⁵ Mousa Rezaee, R. J. (2020). *Robust adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear uncertain MIMO fluttering FGP plate based on feedback linearization*, *Aerospace Science and Technology*.

					limitadas y evita el parloteo no deseado de las entradas de los subsistemas
66	Diseño de controlador independiente para procesos MIMO basado en un desacoplador simplificado extendido y una función de transferencia equivalente	R.Hanuma Naik, D.V. Ashok Kumar y P.Sujatha	2020	INDIA	Enfoque que reduce la complejidad en la aproximación del modelo matemático del proceso desacoplado y mejora el rendimiento del proceso general
67	Un enfoque adaptativo de aprendizaje de refuerzo profundo para el control MIMO PID de robots móviles	Ignacio Carlucho, Mariano De Paula y Gerardo G	2020	ARGENTINA	-Estrategia de control de bajo nivel basada en PID adaptable. -Los PID MIMO se ajustan mediante un aprendizaje de refuerzo profundo. -Los gradientes del crítico se invierten para lograr acciones dentro del rango requerido. -Los resultados en robots en tiempo real demuestran la viabilidad de la propuesta.
68	El diseño de control centralizado basado en el enfoque de desintonización óptimo para procesos MIMO	Shubham Khandelwal, Ketan P. Detroja	2020	INDIA	-Procedimiento de parametrización del ETF para la estructura de control centralizada. -Diseño óptimo del controlador centralizado para el sistema

⁶⁶ R. Hanuma Naik, D. V. (2020). *Independent controller design for MIMO processes based on extended simplified decoupler and equivalent transfer function*, *Ain Shams Engineering Journal*.

⁶⁷ Carlucho, I., Mariano, D., & Acosta, G. (2020). *An adaptive deep reinforcement learning approach for MIMO PID control of mobile robots*, *ISA Transactions*.

⁶⁸ Khandelwal, S., & Detroja, K. (2020). *The optimal detuning approach based centralized control design for MIMO processes*, *Journal of Process Control*.

					multivariable. -Enfoque de desintonización para el controlador PI multivariable. -Algoritmo de evolución diferencial para métodos de diseño 1-ODP y 2-ODP.
--	--	--	--	--	--

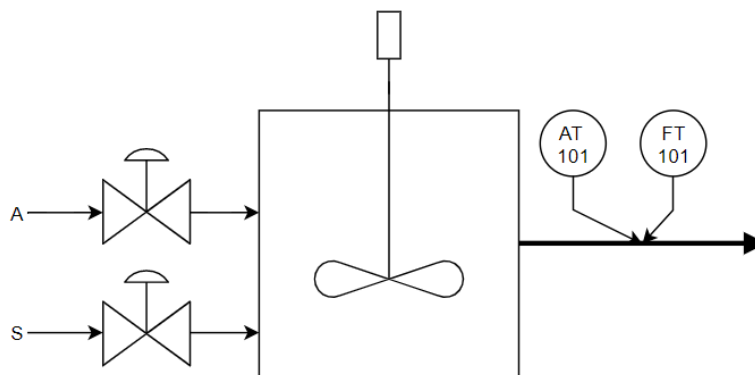
4.2 BASES DE LA ESTRATEGIA

En base a las investigaciones anteriores se determina que es indispensable para el desarrollo de la estrategia de control tener presente lo siguiente:

Los procesos en los que se debe controlar más de una variable se denominan procesos multivariables o simplemente procesos con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO por sus siglas en inglés).

Estos sistemas se caracterizan porque una entrada afecta a varias salidas y de igual forma una salida es afectada por varias entradas, un ejemplo común de aplicación del control multivariable es un sistema de mezclado, donde se requiere controlar el flujo de salida y la fracción de masa que sale de un componente A, para lograr tal objetivo se utilizan dos válvulas para el control: una para controlar la corriente A, y otra para la corriente S, como muestra la Figura 31.

Figura 31. Diagrama P&ID proceso de mezclado con control multivariable.



Fuente: Control Automático de Procesos, Teoría y Práctica – Smith Corripio

La representación matemática de lo descrito anteriormente es:

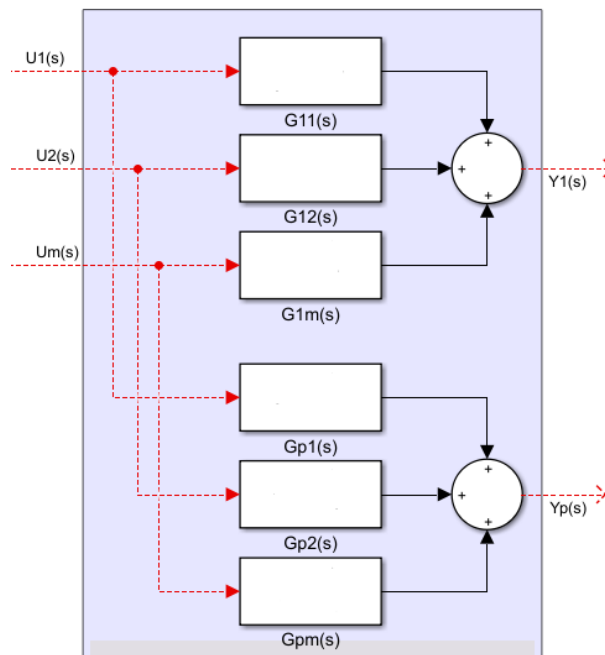
$$Y_1(s) = G_{11}(s)U_1(s) + \dots + G_{1m}(s)U_m(s) \quad (39)$$

$$Y_p(s) = G_{p1}(s)U_1(s) + \dots + G_{pm}(s)U_m(s) \quad (40)$$

Representado gráficamente a través del diagrama de bloques se muestra en la Figura 32, donde se puede observar la interacción entre las variables o procesos.

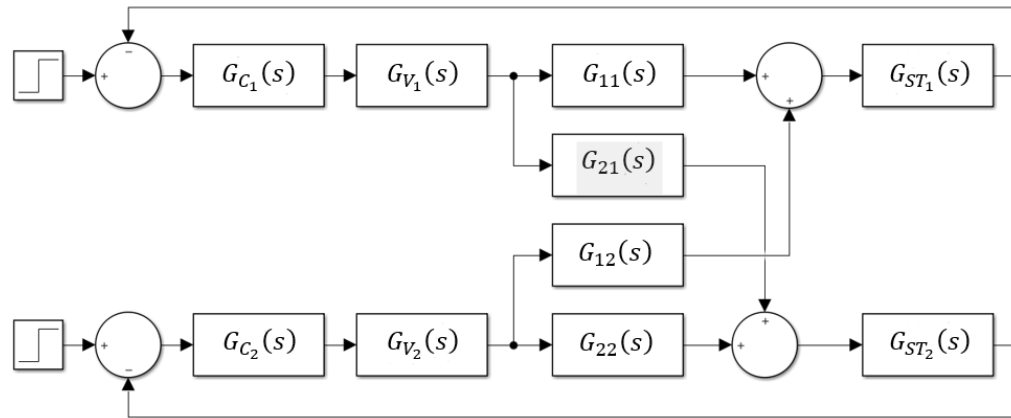
Este tipo de sistemas poseen diferentes problemáticas entre las cuales se encuentra el nivel de interacción entre las variables a controlar, esto es visible al observar a través de la función de transferencia de cada salida y cada entrada como cambia en función de los demás lazos de control. Otro problema de los sistemas multivariables es la dificultad de sintonizar los controladores de cada lazo de forma independiente con la interacción presente.

Figura 32. Diagrama en bloques sistemas multivariables



El diagrama de bloques de un proceso multivariables con 2 variables controladas y 2 variables manipuladas se muestra en la figura 33.

Figura 33. Diagrama de bloques parcial de un proceso multivariable 2x2.



Fuente: Control Automático de Procesos, Teoría y Práctica – Smith Corripio

Del diagrama de bloques cabe resaltar que los términos:

- $G_{C1}(s)$: Función de transferencia del controlador del sistema 1.
- $G_{V1}(s)$: Función de transferencia del elemento final de control del sistema 1.
- $G_{11}(s)$: Función de transferencia del sistema 1.
- $G_{21}(s)$: Función de transferencia que describe la influencia del sistema 1 sobre el sistema 2.
- $G_{12}(s)$: Función de transferencia que describe la influencia del sistema 2 sobre el sistema 1.
- $G_{22}(s)$: Función de transferencia del sistema 2.
- $G_{C2}(s)$: Función de transferencia del controlador del sistema 2.
- $G_{V2}(s)$: Función de transferencia del elemento final de control del sistema 2.
- $G_{ST1}(s)$: Función de transferencia del sensor transmisor del lazo de control 1.
- $G_{ST2}(s)$: Función de transferencia del sensor transmisor del lazo de control 2.

El sistema mostrado en la Figura 33 presenta inconvenientes ya que la estabilidad depende de la matriz de ganancias del sistema mismo. Por lo último expuesto se debe implementar una herramienta al lazo de control que elimine o disminuya el nivel de interacción entre sistemas.

Con el fin de reducir o eliminar la interacción entre las variables a controlar, se puede elaborar un sistema de control en el cual se desacoplen los circuitos que interactúan o se encuentran acoplados. Si se deseara conocer el nivel de influencia de una variable sobre otra, se debe usar la matriz de ganancia relativa, esta indica cuando puede resultar beneficioso el uso de una malla de desacople.

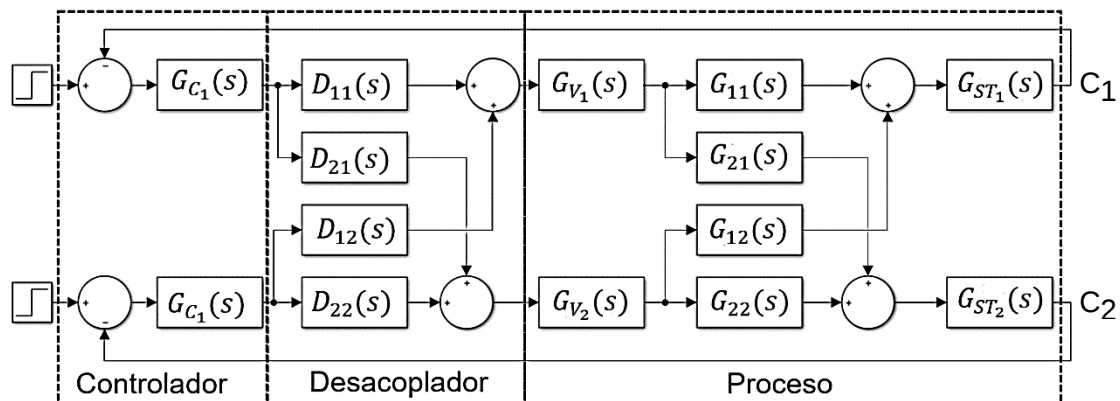
Para ello deben analizarse los valores de dicha matriz (4 valores de ganancia para un sistema multivariable 2x2), mientras más cercano es el valor de los términos de la matriz entre sí, mayor es la interacción de los circuitos.

En la práctica por lo general es suficiente la experiencia operativa o la heurística del ingeniero de control para tomar una decisión en el uso o no de una malla de desacople.

Para el desarrollo del análisis de acoplamiento se considera el sistema general de control 2 x 2 con interacción como se muestra en la Figura 33.

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 33, ilustra gráficamente la interacción entre los dos circuitos; para evitar dicha interacción se puede diseñar e instalar un desacoplador como el que se muestra en la Figura 34.

Figura 34. Sistema interactivo general 2 x 2 con desacoplador.



El desacoplador se debe diseñar de tal manera que con la combinación proceso-desacoplador se obtengan dos circuitos de control que parezcan independientes, como lo indica matemáticamente las siguientes expresiones.



$$\frac{\partial C_1}{\partial M_2} \vee M_1 = 0 \quad (41)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial M_1} \vee M_2 = 0 \quad (42)$$

Es decir, el des acoplador se debe diseñar de tal manera que se asegure que con un cambio en la salida del controlador 1 ($G_{C_1}(s)$), se produzca un cambio en $C_1(s)$, pero no en $C_2(s)$; de igual forma, con un cambio en la salida del controlador 2 ($G_{C_2}(s)$), se debe producir un cambio en $C_2(s)$, pero no en $C_1(s)$.

Otra forma de interpretar el des acoplador es verlo como parte de los controladores, obteniendo una combinación controlador-des acoplador, teniendo así un controlador interactivo para producir un sistema no interactivo.

Para obtener la malla de desacople (D_{11} , D_{21} , D_{12} , D_{22}) se analiza el flujo de energía o el diagrama de bloques del sistema completo.

Matemática para la salida $C_1(s)$.

$$C_1(s) = G_{ST_1} G_{11} G_{V_1} D_{11} G_{C_1} + G_{ST_1} G_{12} G_{V_2} D_{22} G_{C_2} + G_{ST_1} G_{11} G_{V_1} D_{12} G_{C_2} \quad (43)$$

De lo anterior se desea que:

$$G_{ST_1} G_{C_2} [G_{12} G_{V_2} D_{22} + G_{11} G_{V_1} D_{12}] = 0 \quad (44)$$

$$G_{12} G_{V_2} D_{22} + G_{11} G_{V_1} D_{12} = 0$$

$$D_{12} = \frac{-G_{12} G_{V_2} D_{22}}{G_{11} G_{V_1}}$$

De forma semejante para la salida $C_2(s)$

$$C_1(s) = G_{ST_2} G_{22} G_{V_2} D_{22} G_{C_2} + G_{ST_2} G_{21} G_{V_1} D_{11} G_{C_1} + G_{ST_2} G_{22} G_{V_2} D_{21} G_{C_1} \quad (45)$$

$$G_{ST_2} G_{C_1} [G_{21} G_{V_1} D_{11} + G_{22} G_{V_2} D_{21}] = 0 \quad (46)$$



SC-CER96940

"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona
 Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
 www.unipamplona.edu.co



$$G_{21}G_{V_1}D_{11} + G_{22}G_{V_2}D_{21} = 0$$

$$D_{21} = \frac{-G_{21}G_{V_1}D_{11}}{G_{22}G_{V_2}}$$

Del planteamiento inicial se sabe que hay cuatro incógnitas correspondientes a la malla de desacople, y resultado del análisis se han obtenido dos ecuaciones, por lo tanto, se tienen dos grados de libertad, lo que significa que dos de las incógnitas se deben fijar antes de calcular el resto. Un procedimiento común es igualar los términos D_{11} y D_{22} a la unidad, teniendo como resultado las expresiones para D_{12} y D_{21} respectivamente.

$$D_{12} = \frac{-G_{12}G_{V_2}}{G_{11}G_{V_1}} \quad (47)$$

$$D_{21} = \frac{-G_{21}G_{V_1}}{G_{22}G_{V_2}} \quad (48)$$

4.3 DESARROLLO DE LA ESTRATEGIA

1. Identificar las funciones de transferencia de cada proceso (G_{11} , G_{22}) y las funciones de transferencia de su interacción (G_{12} , G_{21}). Para ello realice las siguientes acciones.
 - a. Configure los procesos en lazo abierto, es decir, sin control alguno donde se mantenga la idea de Entrada/Proceso/Salida.
 - b. Identifique plenamente las variables manipuladas para cada variable a controlar, por ejemplo, el ángulo de disparo para aumentar la temperatura de una resistencia eléctrica para variar la temperatura en un tanque de agua y el nivel de apertura de una electroválvula para variar el nivel de líquido en el mismo tanque.
 - c. Para un sistema 2x2, aplique un escalón de activación a cada variable manipulada hasta que ambos sistemas se haya estabilizado o se encuentren en estado permanente. Lo mencionado anteriormente se refleja en la Figura 35.



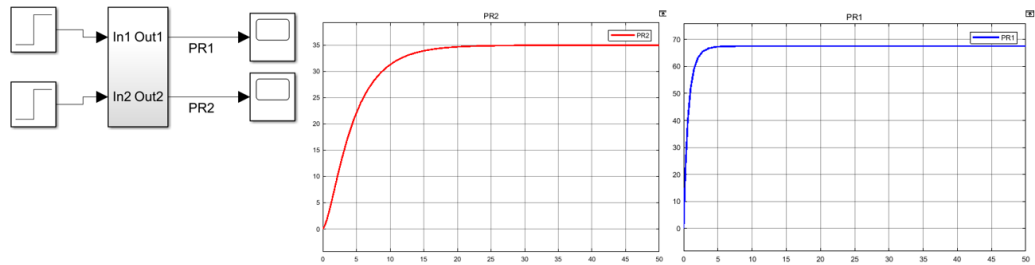
SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

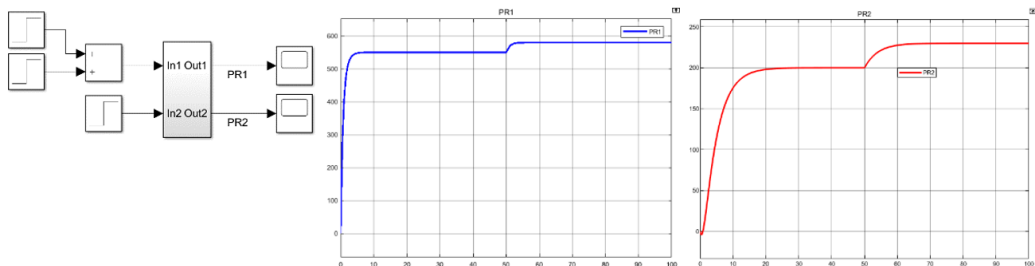
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Figura 35. Proceso multivariable en lazo abierto.



- d. En seguida aplique un segundo escalón al proceso uno y mantenga constante el escalón aplicado al proceso 2, como muestra la Figura 36. Procurar que el segundo escalón aplicado al proceso 1 no exceda el 10% del primer escalón aplicado.

Figura 36. Identificación de $G_{11}(s)$ y $G_{21}(s)$



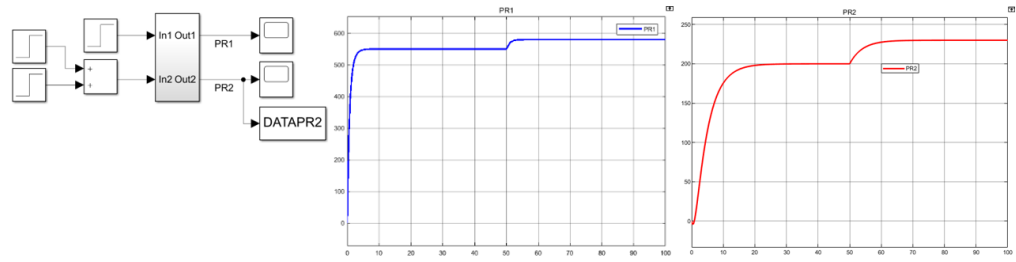
Con la información de las gráficas obtenidas a partir del tiempo de aplicación del segundo escalón es posible identificar $G_{11}(s)$ de la salida 1 (PR1) y $G_{21}(s)$ de la salida 2 (PR2).

La respuesta obtenida en la data del proceso 1 después de aplicado el segundo escalón representa y es la información que debe utilizarse para obtener la función de transferencia de dicho proceso, es decir, G_{11} .

Por otro lado, la respuesta obtenida en la data del proceso 2 después de haber aplicado el segundo escalón representa y es la información que debe utilizarse para obtener la función de transferencia de relación del proceso 1 con el proceso 2, es decir, G_{21} .

- e. Una vez se haya obtenido e identificado la respuesta del proceso 1 y su relación con el proceso 2, se repite el mismo procedimiento para obtener la respuesta de este último ante un segundo escalón, como muestra la Figura 37.

Figura 37. Identificación de $G_{22}(s)$ y $G_{12}(s)$



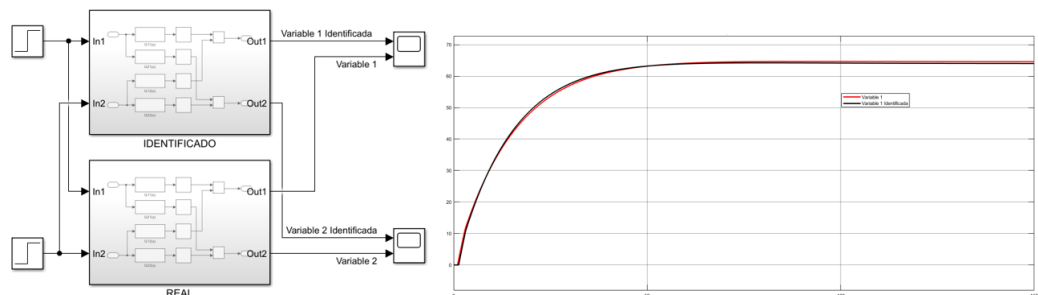
Con la información de las gráficas obtenidas a partir del tiempo de aplicación del segundo escalón es posible identificar $G_{22}(s)$ de la salida 2 (PR2) y $G_{12}(s)$ de la salida 1 (PR1).

La respuesta obtenida en la data del proceso 2 después de aplicado el segundo escalón representa y es la información que debe utilizarse para obtener la función de transferencia de dicho proceso, es decir, G_{22} .

Por otro lado, la respuesta obtenida en la data del proceso 1 después de haber aplicado el segundo escalón representa y es la información que debe utilizarse para obtener la función de transferencia de relación del proceso 2 con el proceso 1, es decir, G_{12} .

- f. En este punto se deben de haber obtenido las funciones de transferencia de los procesos y su relación. Para identificar los procesos y obtener las funciones de transferencia se puede emplear alguno de los numerosos métodos existentes, por ejemplo, el método de los dos puntos de Smith.
- g. Corroborar a través de simulación la correlación entre los sistemas identificados y la información real del sistema. Esto puede realizarse de forma visual comparando las salidas u obteniendo un residual de las entradas. El modo grafico se muestra la figura 38.

Figura 38. Corroboración de la identificación del sistema.





2. Calcular los componentes de la malla de desacople, para ello aplique las ecuaciones correspondientes a D_{12} y D_{21} . Para sistemas con tiempo muerto tenga en cuenta la aproximación de Taylor para dicho factor y así obtener la malla de desacople.

De igual forma verificar que el sistema con tiempo muerto es equivalente al sistema con tiempo muerto por aproximación de primer orden de Taylor.

3. Sintonización de controlador para $G_{11}(s)$ y $G_{22}(s)$. Como mencionó la malla de desacople permite aislar la interacción entre las variables a controlar, por lo tanto, es posible sintonizar un controlador de forma independiente para cada variable.

Utilice las funciones de transferencia identificadas de $G_{11}(s)$ y $G_{22}(s)$ para sintonizar el controlador haciendo uso de Ziegler & Nichols. Realizar el lazo cerrado independiente para cada variable permite validar si los márgenes de respuesta transitoria y permanente son los esperados, por lo mismo realice ajustes al controlador sintonizado en caso de ser necesario.

4. Construya el lazo de control multivariable con la malla de desacople calculada en el punto 2 y los controladores sintonizados en el punto anterior, teniendo como referencia el diagrama en bloques de la Figura 4.

Utilice este diagrama para realizar pruebas a los controladores para cada variable, como cambio de setpoint doble.

5. El objetivo de la malla de desacople es eliminar el efecto de una variable sobre otra, para validar este hecho se hace uso de la segunda proyección, que corresponde al análisis visual de las salidas en el tiempo de aplicación de un escalón sobre la otra entrada. Por ejemplo, al aplicar doble escalón a la variable 1, se revisa la salida de la variable 2 en el tiempo de aplicación del segundo escalón sobre la variable 1, esto indica la influencia que tiene la variable 1 sobre la variable 2.
6. Obtenido los controladores por el método de Ziegler and Nichols y validado su correcto funcionamiento, se procede a sintonizar los controladores de lógica difusa que utilicen como entradas al error, delta error y sumatoria del error de los antes mencionados y como salidas a la acción de control compensatoria que estos emiten. Para ello en primera instancia se debe determinar qué tipo de arquitectura de control se desea implementar (PD difuso, PI difuso, PID difuso), posteriormente definir en el orden que se mencionan los universos de discurso, las variables lingüísticas, los conjuntos difusos y las reglas difusas.
7. Reemplace en el lazo de control multivariable los controladores PID por los controladores lógicos difusos creados en el paso 6.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



8. Al tener funcionando el controlador difuso en un solo setpoint, se deberá encontrar una serie de ganancias que permita que el controlador alcance el setpoint al variarlo, estas serán utilizadas para calcular un polinomio que realice la función que hacíamos al encontrar las ganancias.
9. Para evaluar la robustez de los controladores, agregue al lazo de control multivariable desarrollado en el punto 6 los ítems de ruido y perturbaciones.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



5. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DESARROLLADA PARA SISTEMAS MIMO EN UN CASO DE ESTUDIO SIMULADO

Para aplicar la metodología se utilizó las ecuaciones obtenidas de la columna de destilación metano-agua de (Wood and Berry,1973)⁶⁹.

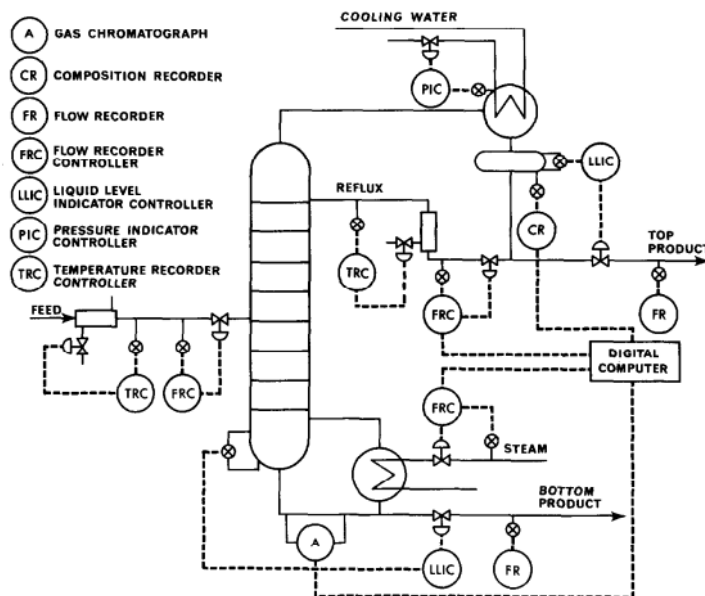
5.1 COLUMNA DE DESTILACIÓN

La columna está compuesta por 8 bandejas de 9 pulgadas de diámetro, equipada con un condensador total y un rehervidor tipo cesta. Las bandejas, con una separación de 12 pulgadas, están equipadas con cuatro tapones de burbuja de 2 1/4 X 1 7/8 pulgadas dispuestos en un patrón cuadrado. La figura 39 es un diagrama esquemático de la columna que muestra su instrumentación asociada y la interfaz con el ordenador digital IBM 1800. Se emplearon controladores analógicos en todos los lazos de control, excepto en la composición de la parte superior y los fondos, que se controlaron mediante el ordenador. La acción de control requerida para las variables manipuladoras en los lazos de composición, reflujo y flujo de vapor, se conectaron en cascada a los puntos de ajuste de los controladores de flujo apropiados. Para el análisis de la composición superior se utilizó una célula de capacitancia en línea continua. La composición del fondo se analizó mediante un cromatógrafo de gases Beckman Serie C modificado de forma que la inyección de la muestra y el análisis del cromatograma se realizaban por ordenador. Las condiciones empleadas para el análisis y otros detalles del sistema de cromatografía⁷⁰.

⁶⁹ R. Wood, M. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column", Chemical Engineering Science, vol. 28, no. 9, pp. 1707 1717, 1973.

⁷⁰ R. Wood, M. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column", Chemical Engineering Science

Figura 39. Diagrama esquemático de la columna.



Fuente: (Wood and Berry,1973).

(Kumar and Anand,2020) describe que las columnas en los procesos se utilizan para la separar los componentes líquidos de una mezcla mediante la destilación. El principio básico para la separación de los líquidos es la volatilidad de cada componente y dependiendo del peso entre más liviano sea este se desplazará más hacia la parte superior de la columna cuando se caliente. Las bandejas de la columna se utilizan para separar la mezcla del metanol-agua que tienen un punto de ebullición de 100°C y $64,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Por lo general esta columna en el proceso consume más del 50% de la energía suministrada a la planta que es utilizada para la calefacción como refrigeración, el consumo energético se puede optimizar mediante un control eficaz⁷¹. Función de los componentes internos de la columna:

- Las bandejas se utilizan para mejorar la separación de los componentes.

⁷¹ R. Kumar, S. Anand, A. Khulbey and A. Nath Jha, "Design of Fractional Order Controller for Wood-Berry distillation column," 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342220.



- Un rehervidor se utiliza para proporcionar calor para la vaporización necesaria desde el fondo de la columna.
- El condensador se utiliza para enfriar y condensar el vapor de la parte superior de la columna de destilación.
- El tambor de reflujo se utiliza para retener el vapor condensado de manera que el reflujo líquido pueda ser reciclado desde la parte superior de la columna.
- La columna de destilación contiene una corriente de alimentación y dos corrientes de producto.
- La alimentación contiene un porcentaje molar del componente llamado X_F .
- La corriente del producto en la parte superior tiene una composición denominada X_D .
- La corriente del producto que sale de la parte inferior contiene una composición de X_B del componente ligero.

5.1.1 Modelado matemático

(Acharya and Dumpa, 2016) simplificó el proceso de la figura 40 en un esquema simple, donde la retención de líquido se asume en cada matriz de la columna de destilación. Se utiliza la fórmula de Francis-Weir (Ecuación 49) para linealizar y modelar la variable retención de líquido. El desarrollo algebraicamente la siguiente matemática del proceso⁷²

$$L_n = L_{no} + \frac{M_n - M_{no}}{\beta} \quad (49)$$

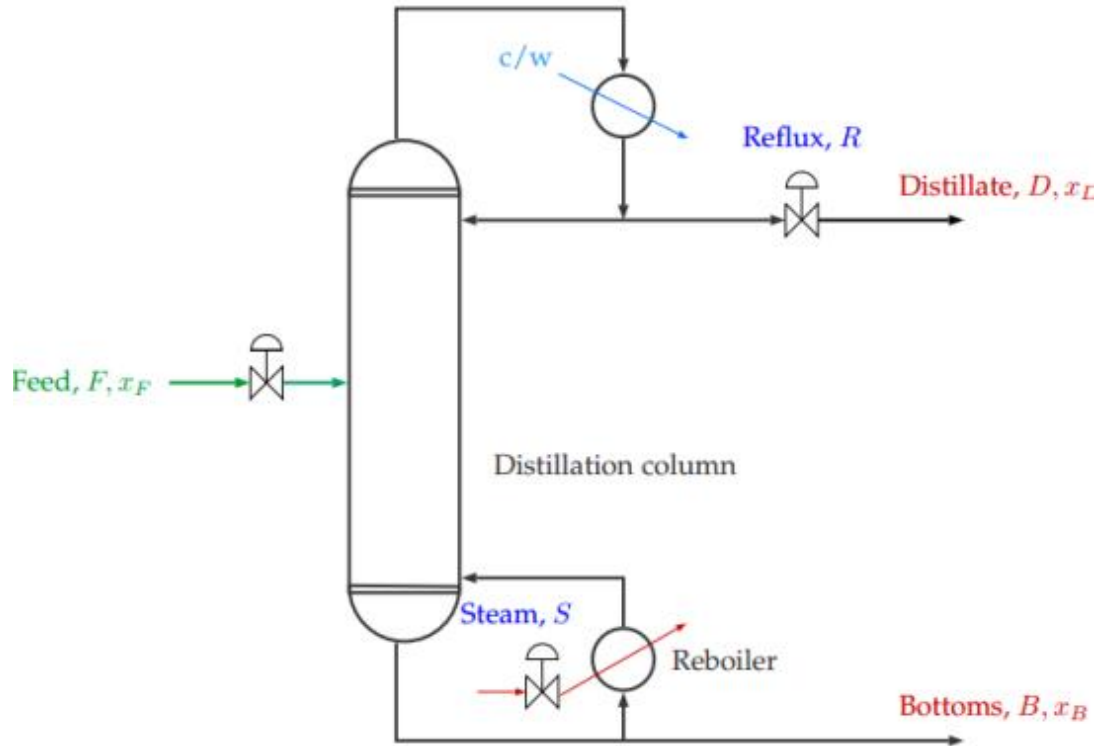
⁷²Acharya, P., Dumpa, G., & Dan, T. K. (2016, April). Modelling and control of distillation column. In *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)* (pp. 123-128). IEEE.



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Figura 40. Diagrama esquemático de la columna.



Fuente: (Acharya and Dumpa,2016)

Para el condensador y el tambor de reflujo el modelo matemático puede ser representado como

$$\frac{dM_D}{dt} = V_{NT} - (R + D_L + D_Y) \quad (50)$$

$$\frac{dM_D X_D}{dt} = V_{NT} Y_{NT} - (R + D_L) X_D - D_Y Y_D \quad (51)$$

Para la bandeja superior, el modelo matemático puede representarse como

$$\frac{dM_{NT}}{dt} = R + V_{NT-1} - L_{NT} - V_{NT} \quad (52)$$

$$\frac{dM_{NT}X_{NT}}{dt} = RX_D + V_{NT-1}Y_{NT-1} - L_{NT}X_{NT} - V_{NT}Y_{NT} \quad (53)$$

Para la enésima bandeja el modelo matemático es

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} - L_n + V_{n-1} - V_n \quad (54)$$

$$\frac{dM_nX_n}{dt} = L_{n+1}X_{n+1} - L_nX_n + V_{n-1}Y_{n-1} - V_nY_n \quad (55)$$

Para la bandeja de alimentación el modelo matemático es

$$\frac{dM_{NF}}{dt} = L_{NF+1} - L_{NF} + V_{NF-1} - V_{NF} + F_L \quad (56)$$

$$\frac{dM_{NF}X_{NF}}{dt} = L_{NF+1}X_{NF+1} - L_{NF}X_{NF} + V_{NF-1}Y_{NF-1} - V_{NF}Y_{NF} + F_LZ_L \quad (57)$$

Para el rehervidor el modelo matemático es

$$\frac{dM_B}{dt} = L_1 - V_B - B \quad (58)$$

$$\frac{dM_BX_B}{dt} = L_1X_1 - V_BY_B - BX_B \quad (59)$$

El significado de las variables utilizadas en la matemática de la columna se encuentra en la tabla 4 con su respectiva unidad.

Tabla 4. Nomenclatura.

Símbolo	Descripción	Unidad
D_L	Caudal de líquido destilado	lbmol/h
D_V	Caudal de vapores destilado	lbmol/h

Y_D	Composición de vapores destilado	Fracción molar
X_D	Composición del líquido destilado	Fracción molar
M_D	Retención de líquido en el escenario del tambor de reflujo	Fracción molar
R	Caudal de reflujo	lbmol/h
L_n	Caudal de líquido interno	lbmol/h
L_{no}	Valor de referencia del caudal interno	
M_{no}	Retención molar de referencia para la enésima bandeja	

Fuente: (Acharya and Dumpa,2016)

El modelo de Wood y Berry puede representarse como

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s + 1} & \frac{-18.6e^{-3s}}{21s + 1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s + 1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9s + 1} \\ \frac{4.9e^{-3.4s}}{13.2 + 1} \end{bmatrix} d \quad (60)$$

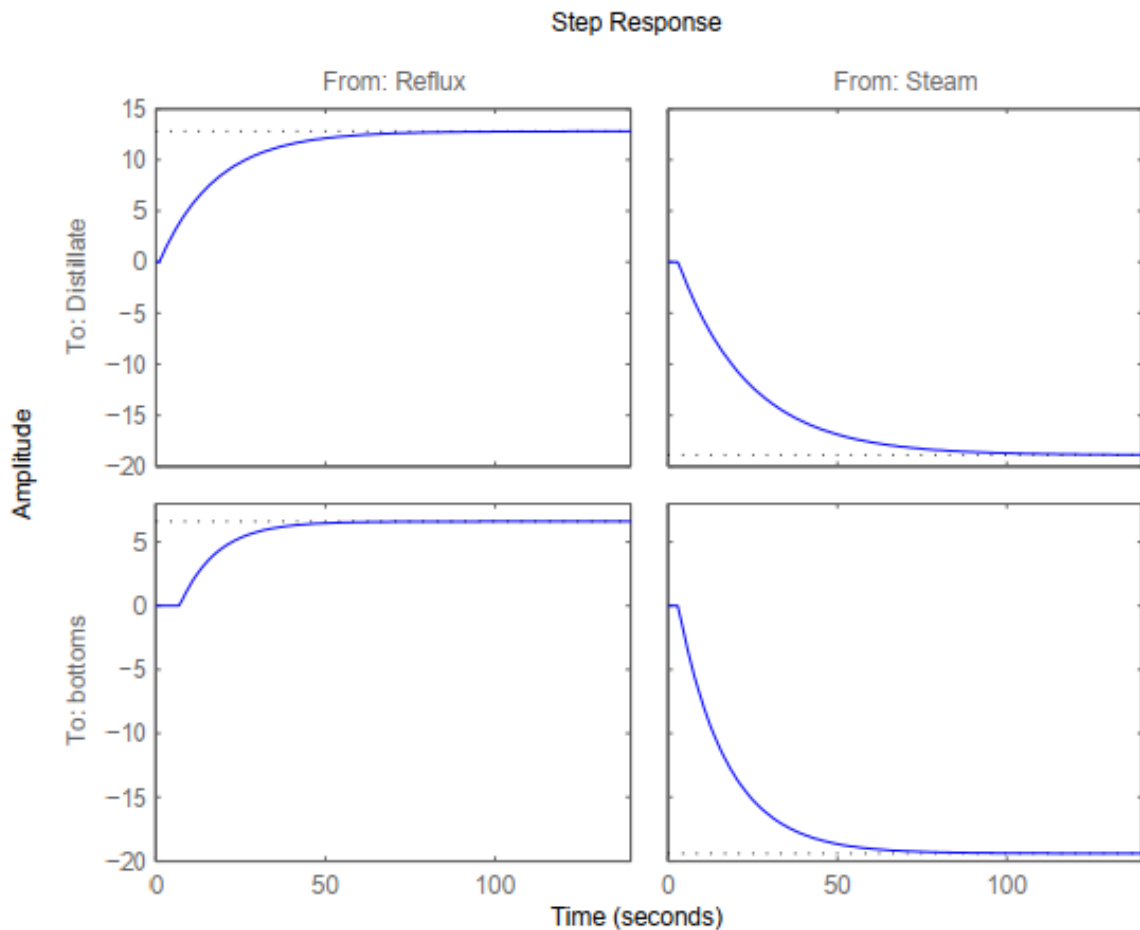
Donde

- y_1 es el metanol destilado [mol%].
- y_2 es el agua [mol%].
- u_1 es el caudal de reflujo [lb/min].
- u_2 es el caudal de vapor [lb/min].
- d es el caudal no medido [lb/min].

Las señales u_1 y u_2 son de entrada, y_1 y y_2 son señales de salida. El caudal no medido d es una perturbación en el sistema⁷³.

Para verificar las funciones de transferencia del modelo de la columna Wood and Berry, se toman como referencia las respuestas obtenidas de (Acharya y Dumpa, 2016) en la figura 41 para comparar con la recreación de los resultados (figura 41), donde los aspectos a tener en cuenta serían el crecimiento tiempo (5 a 95%) y tiempo de estabilización (2%).

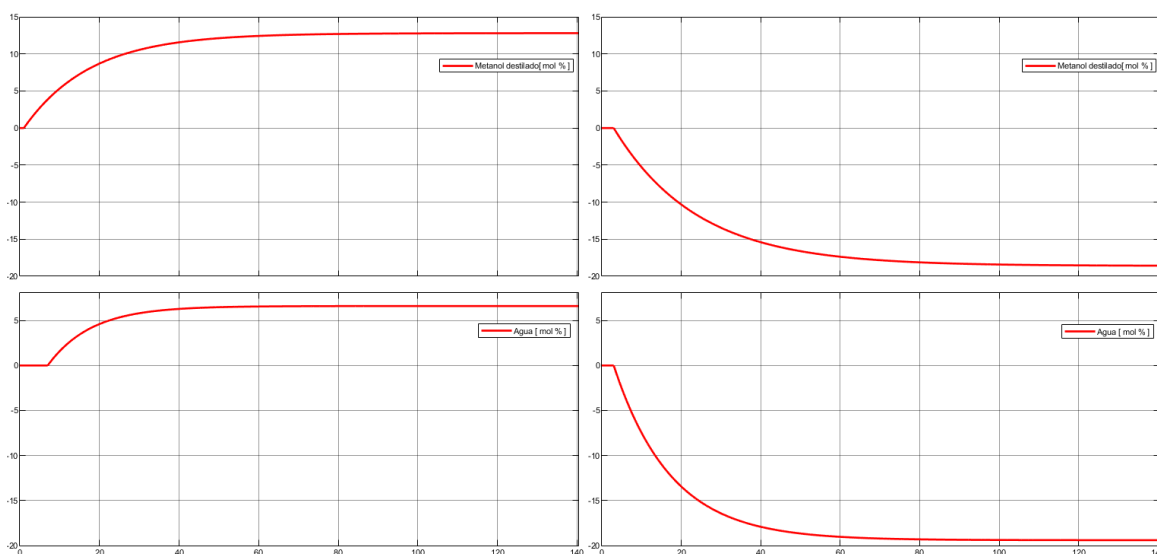
Figura 41. Respuestas en lazo abierto de la columna obtenidas por (Acharya and Dumpa, 2016).



Fuente: (Acharya and Dumpa, 2016)

⁷³ Acharya, P., Dumpa, G., & Dan, T. K. (2016, April). Modelling and control of distillation column

Figura 42. Recreación de las respuestas obtenidas por (Acharya and Dumpa,2016).



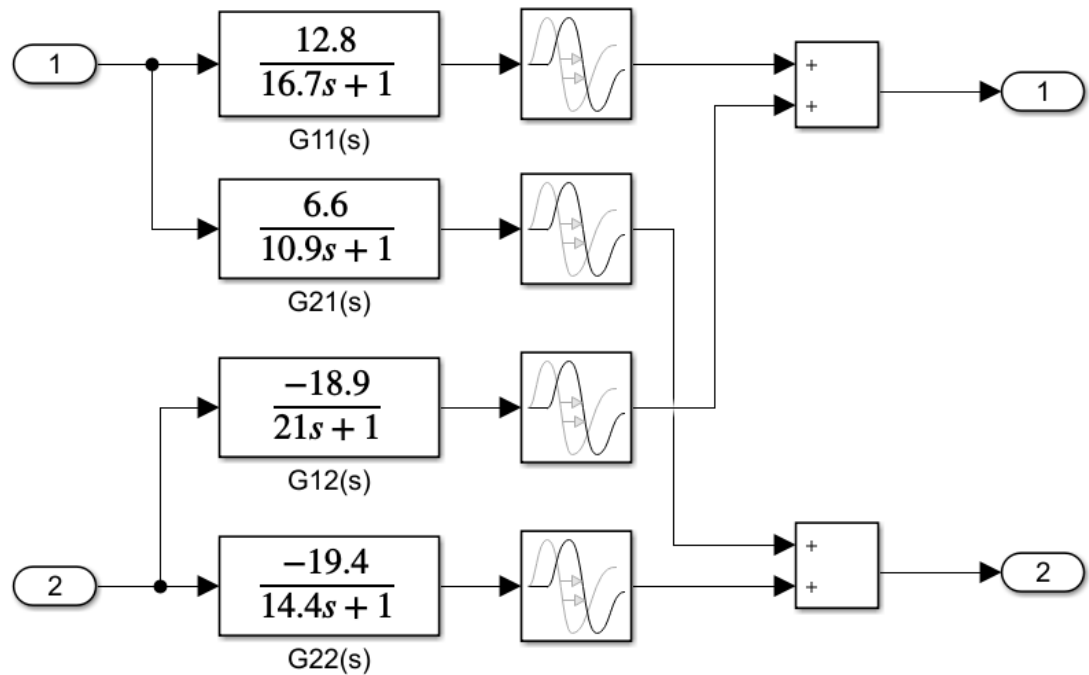
Los tiempos de crecimiento y estabilización de la planta con respecto a las funciones de la tabla 5 tienen una diferencia porcentual menor al 1% lo que indica que tienden a presentar un comportamiento similar.

Tabla 5. Tiempos de crecimiento y estabilización

	G11		G21		G12		G22	
	Tr	Ts	Tr	Ts	Tr	Ts	Tr	Ts
Planta de wood and berry	49.375066	66.25	31.875	48.12	61.25	84.37	42.5	60.9375
Funciones	49.1	66.3	32.1	49.6	61.2	83.6	42.4	59.3

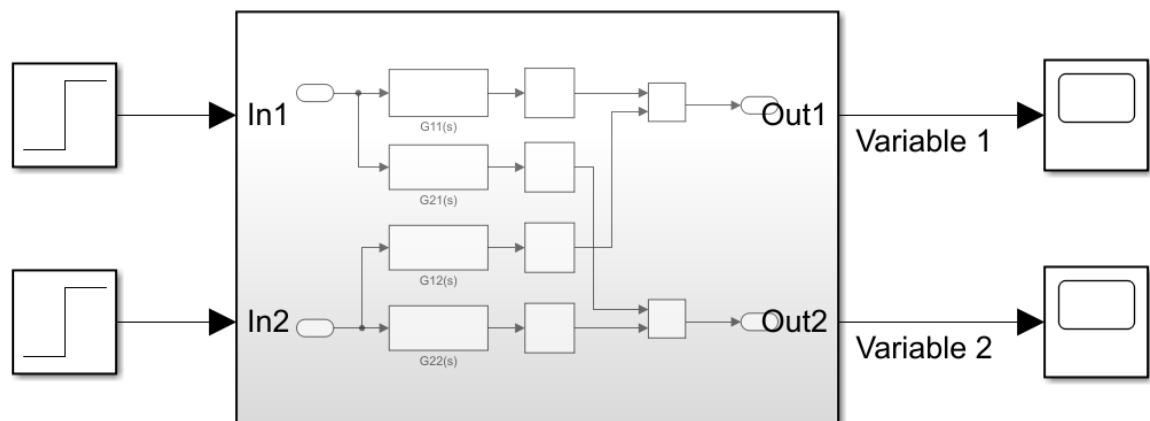
Para aplicar esta metodología debemos de conocer el funcionamiento del proceso, que vamos a controlar y por medio de que actuadores haremos el control. Esta metodología no requiere conocer la matemática del proceso. El diagrama de bloques de la figura 43 muestra la representación de la columna de Wood and Berry en el que se toman para el estudio un sistema de 2x2 donde se realizaran las estrategias de control.

Figura 43. Diagrama de bloques de modelo de columna de destilación 2x2 de Wood-Berry.



En este caso se conocen las funciones de transferencia de los procesos a controlar y además las funciones de transferencia que representan la interacción entre dichos procesos, con el fin de aplicar el procedimiento planteado se tratará como un sistema tipo caja negra, donde los datos conocidos son las entradas y las salidas ante dichas entradas. El diagrama en bloques que representa lo anteriormente mencionado se muestra en la Figura 44.

Figura 44. Diagrama en bloques del sistema tipo caja negra.

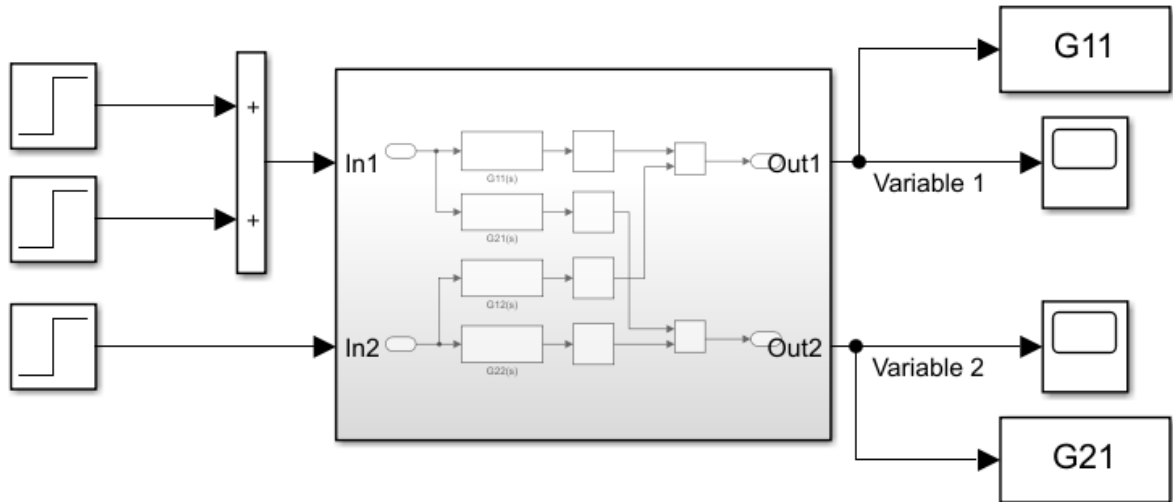


Aplicando el procedimiento planteado, inicialmente se debe identificar las funciones de transferencia G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} que corresponden a la representación matemática de la dinámica de las variables a controlar y la interacción entre estas.

5.2 PASO 1: IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO 1 (G_{11}), PROCESO 2(G_{22}), LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE INTERACCIÓN DE LA VARIABLE 1 CON LA VARIABLE 2 (G_{21}) Y LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE INTERACCIÓN DE LA VARIABLE 2 CON LA VARIABLE 1 (G_{12})

Para ello debe aplicarse un primer escalón hasta que ambos procesos se hayan estabilizado, posteriormente aplicar un segundo escalón en la entrada uno ($In1$). Lo anteriormente mencionado se muestra en la Figura 45.

Figura 45. Diagrama en bloques para la identificación de G_{11} y G_{21} .



Los datos de excitación de las entradas y los tiempos de aplicación se muestran en la Tabla 6. La entrada 2 funciona con valores negativos, esto se puede corroborar en el artículo de (Acharya and Dumpa,2016)⁷⁴ en el que se detalla el concepto de la columna de destilación de Wood and Berry, como funciona, su matemática y la comparación de diferentes estrategias de control en el cual se demuestra la efectividad del controlador predictivo.

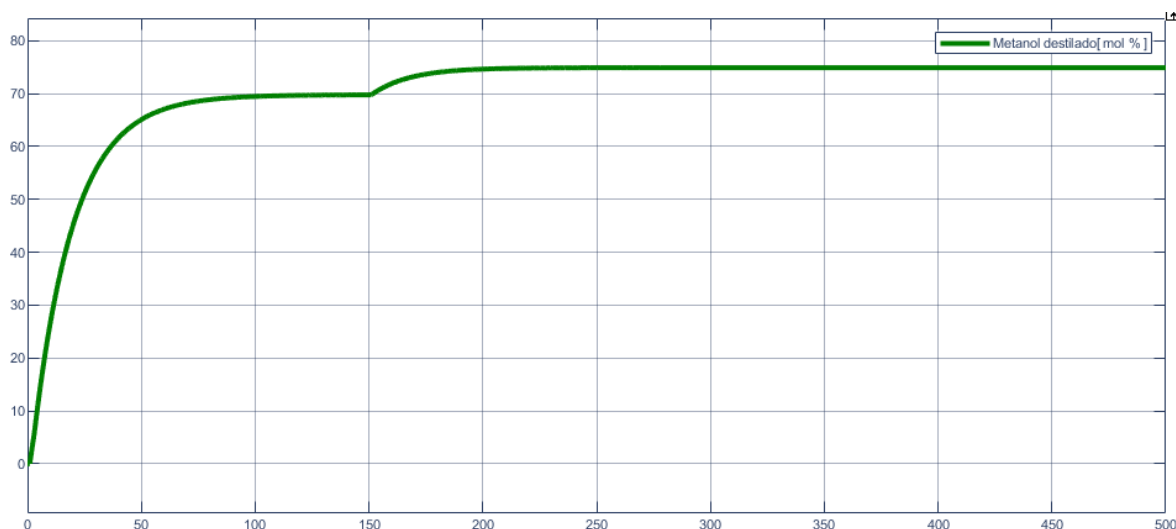
⁷⁴ Acharya, P., Dumpa, G., & Dan, T. K. (2016, April). Modelling and control of distillation column

Tabla 6. Datos para la identificación de G_{11} y G_{21} .

Entrada 1		Entrada 2		Tiempo de aplicación del segundo escalón
Escalón 1	4			
Escalón 2	0.4			

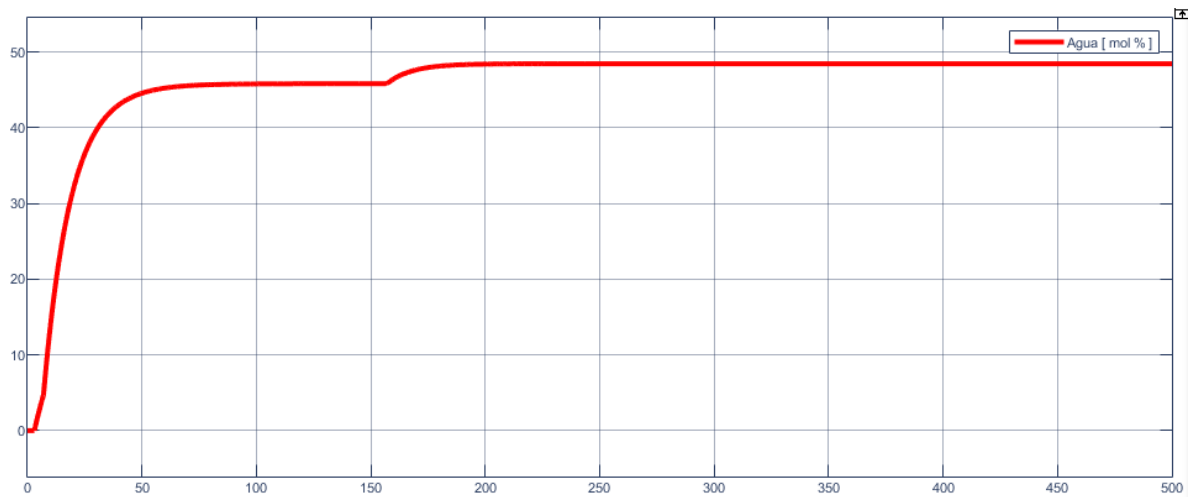
La respuesta de la primera salida del sistema MIMO ante los dos escalones de entrada se muestra en la figura 46 respuesta en el tiempo de la variable metanol destilado ante doble escalón aplicado en la entrada del caudal de reflujo de vapor.

Figura 46 Respuesta en el tiempo de la variable Metanol destilado ante doble escalón aplicado en la entrada del caudal de reflujo de vapor.



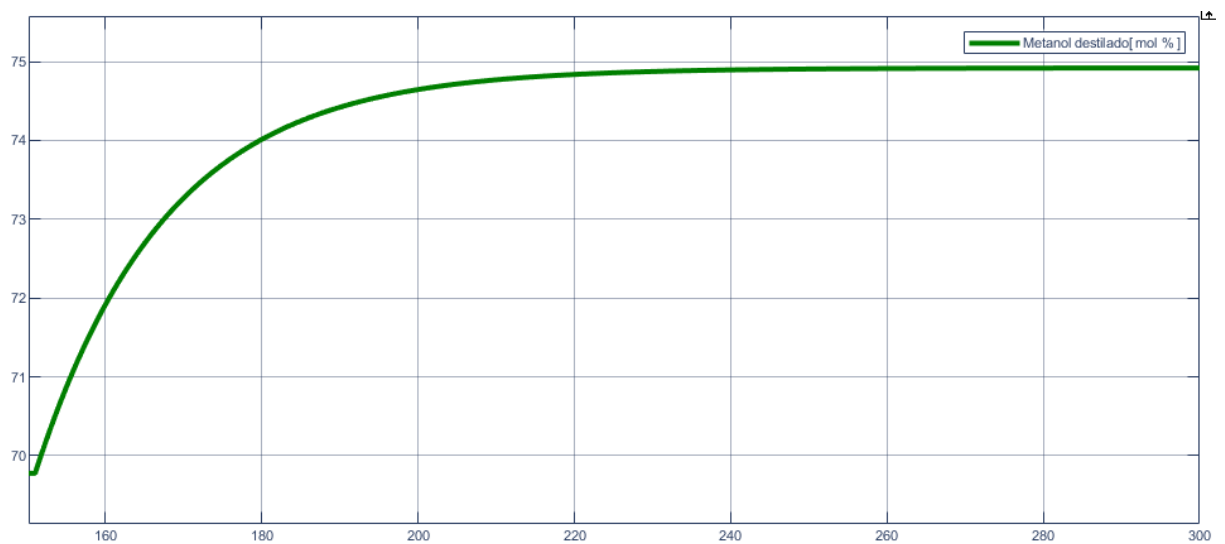
De igual forma la respuesta del proceso dos (2), ante los dos escalones de entrada se muestran en la figura 47. Se debe tener en cuenta que la respuesta después del segundo escalón muestra la dinámica que relaciona el proceso uno (1) con el proceso dos (2), por lo cual es usado para la identificación de G_{21} .

Figura 47. Respuesta en el tiempo de la variable 2 ante doble escalón aplicado en la entrada 1.



Con el fin de identificar la función de transferencia del proceso uno (1) correspondiente a G_{11} se extrae la información de la respuesta una vez aplicado el segundo escalón en la entrada uno (1), en este caso a partir de $t = 150$, como se muestra en la Figura 48 Respuesta del proceso 1 para la identificación de $G_{11}(s)$.

Figura 48. Respuesta del proceso 1 para la identificación de $G_{11}(s)$.





Se aplica el método de identificación de los dos puntos de Smith.

- Cálculo de la ganancia estática:

$$K = \frac{74.87 - 69.77}{4.4 - 4} = 12.75 \quad (61)$$

- Respuesta al 63.2%:

$$Y_{1_{63.2\%}} = ((74.87 - 69.77) * 0.632) + 69.77 = 72.9932 \quad (62)$$

- Respuesta al 28.3%:

$$Y_{1_{28.3\%}} = ((74.87 - 69.77) * 0.283) + 69.77 = 71.2133 \quad (63)$$

- Tiempo 63.2%:

$$t_{63.2\%} = 167.3 - 150 = 17.3 \quad (64)$$

- Tiempo 28.3%:

$$t_{28.3\%} = 156.6 - 150 = 6.6 \quad (65)$$

Tanto al tiempo para 63.2% y 28.3% se resta con 150, porque es el cero para el segundo escalón (Momento donde el segundo escalón se introduce en el sistema).

- Constante de tiempo:

$$\tau = 1.5(17.3 - 6.6) = 16 \quad (66)$$

- Tiempo muerto:

$$t_m = 17.3 - 16 = 1.3 \quad (67)$$



SC-CER96940

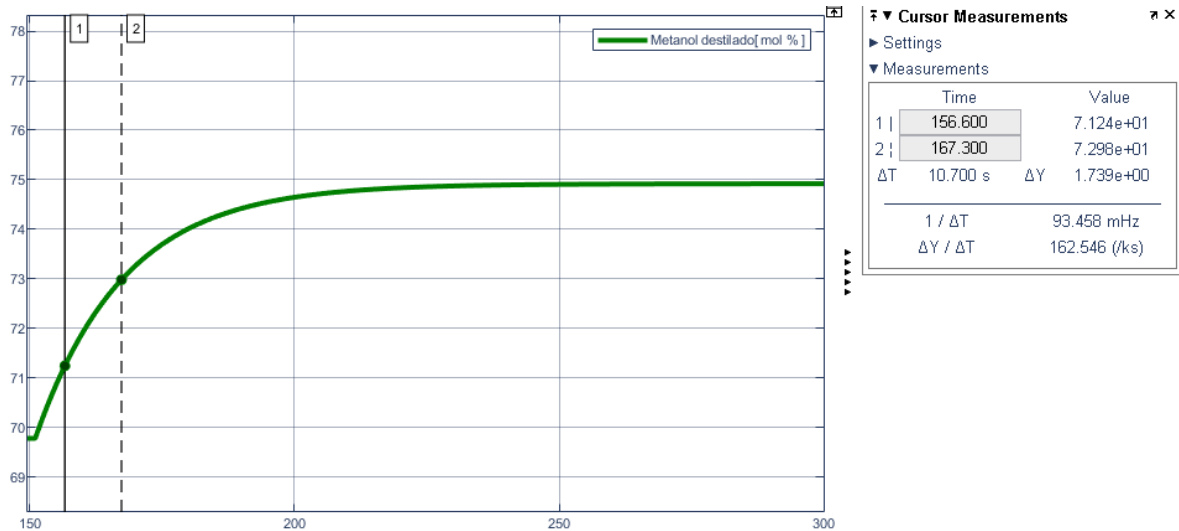


"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Con base en los porcentajes de la salida y la gráfica de respuesta de la salida 1 se obtiene los tiempos para el cálculo de la constante de tiempo y el tiempo muerto del proceso, como se muestra en la figura 49.

Figura 49. Ubicación de los dos puntos para la identificación de G_{11} .

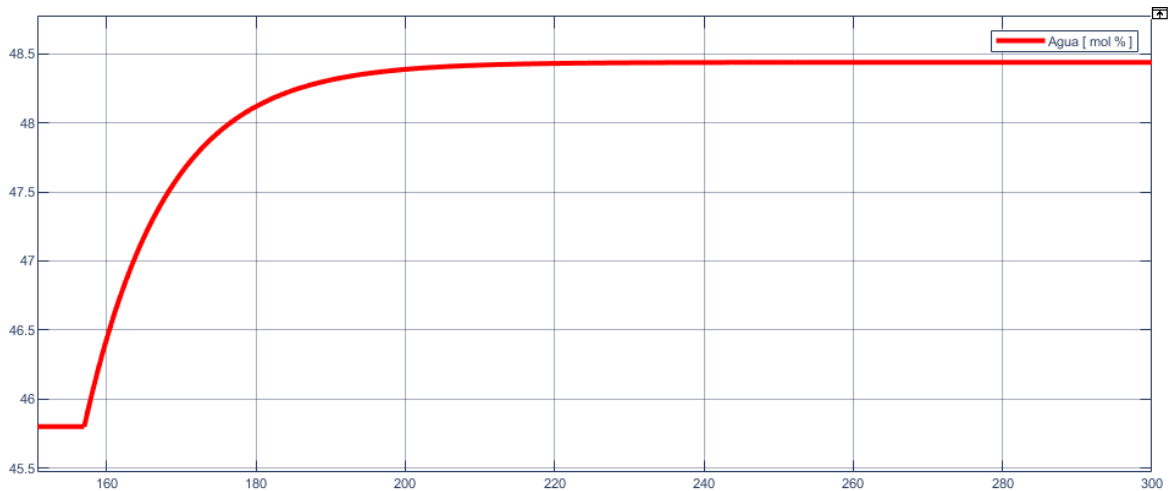


Este último gráfico muestra la dinámica del proceso 1 y con base en dicha información se tiene que el proceso está dado por la función de transferencia:

$$G_{11}(s) = \frac{12.75}{16s + 1} e^{-1.3s} \quad (68)$$

De igual forma se realiza para la identificación de la función de transferencia de interacción de proceso 1 con el proceso 2, es decir, G_{21} . Se extrae la información de la salida Y_2 desde el momento de aplicación del segundo escalón, como muestra la figura 50.

Figura 50. Respuesta del proceso 2 para la identificación de G21(s).



Aplicando el método de identificación de los dos puntos de Smith.

- Cálculo de la ganancia estática:

$$K = \frac{48.44 - 45.8}{4.4 - 4} = 6.6 \quad (69)$$

- Respuesta al 63.2%:

$$Y_{1_{63.2\%}} = ((48.44 - 45.8) * 0.632) + 45.8 = 47.4685 \quad (70)$$

- Respuesta al 28.3%:

$$Y_{1_{28.3\%}} = ((48.44 - 45.8) * 0.283) + 45.8 = 46.5471 \quad (71)$$

- Tiempo 63.2%:

$$t_{63.2\%} = 167.7 - 150 = 17.7 \quad (72)$$

- Tiempo 28.3%:

$$t_{(28.3\%)} = 160.7 - 150 = 10.7 \quad (73)$$

- Constante de tiempo:

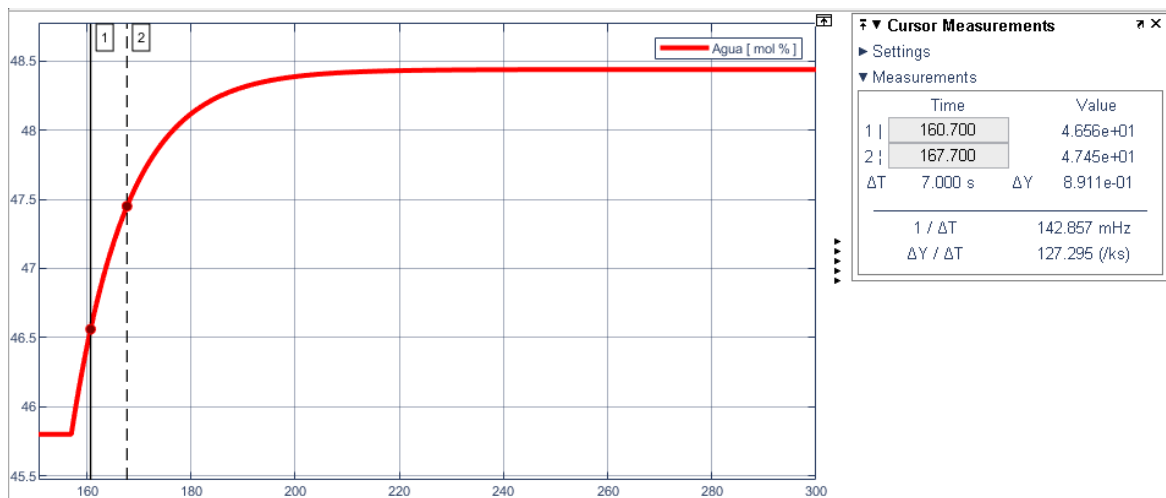
$$\tau = 1.5(17.7 - 10.7) = 10.5 \quad (74)$$

- Tiempo muerto

$$t_m = 17.7 - 10.5 = 7.2 \quad (75)$$

Con base en los porcentajes de la salida y la gráfica de respuesta de la salida 2 se obtiene los tiempos para el cálculo de la constante de tiempo y el tiempo muerto de la interacción del proceso 1 sobre el proceso 2, como se muestra en la figura 51.

Figura 51. Ubicación de los dos puntos para la identificación de $G_{21}(s)$.

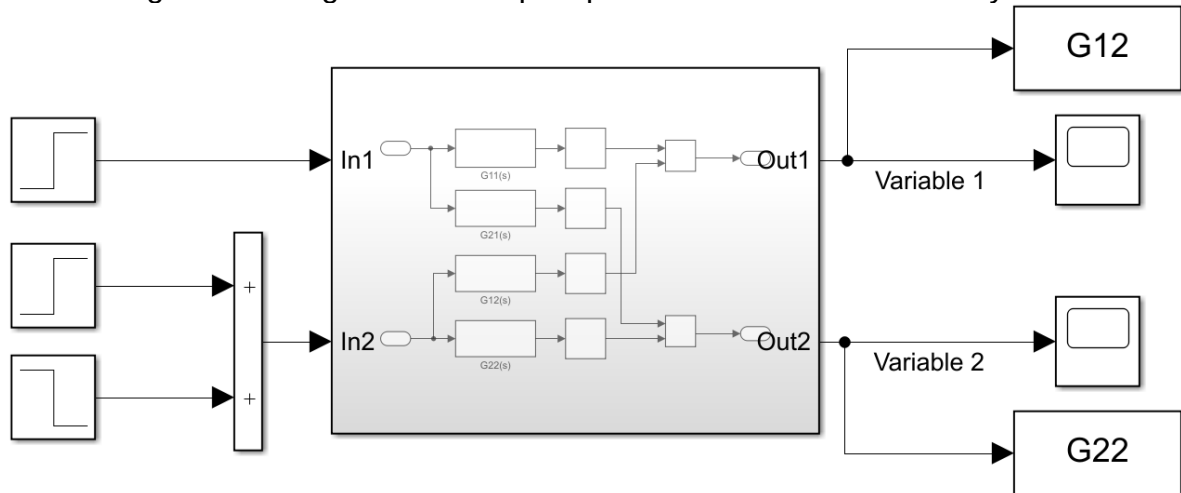


Este último gráfico muestra la dinámica del proceso 1 sobre el proceso 2 y con base en dicha información se tiene que la interacción está dada por la función de transferencia:

$$G_{21}(s) = \frac{6.6}{10.5s + 1} e^{-7.2s} \quad (76)$$

Ahora se realiza la Identificación del proceso 2 (G_{22}) y la función de transferencia de interacción de la variable 2 sobre la variable 1 (G_{12}). Para ello debe aplicarse un primer escalón hasta que ambos procesos se hayan estabilizado, posteriormente aplicar un segundo escalón en la entrada 2. Lo anteriormente mencionado se muestra en el diagrama de bloques de la figura 52.

Figura 52. Diagrama en bloques para la identificación de G_{22} y G_{12} .



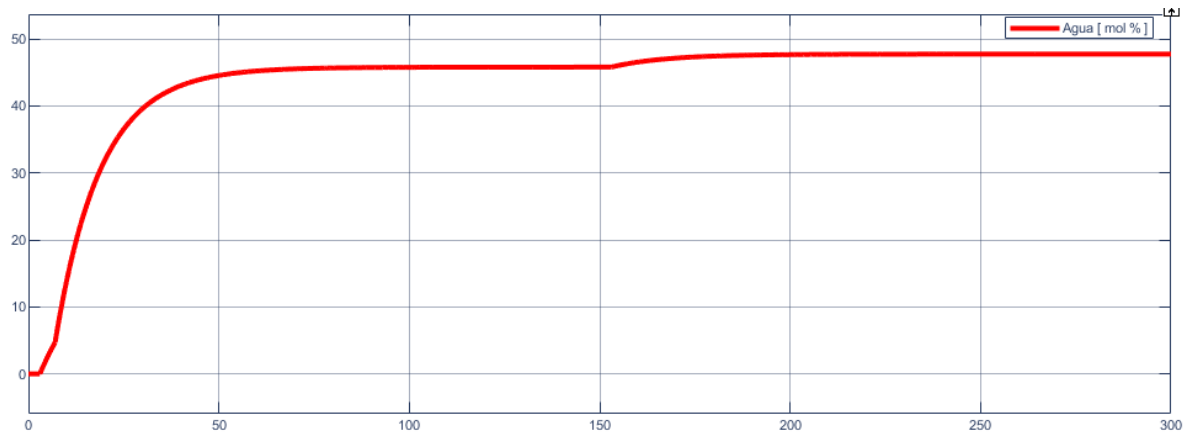
Los datos de excitación de las entradas y los tiempos de aplicación se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos para la identificación de G_{22} y G_{12} .

Entrada 1		Entrada 2		Tiempo de aplicación del segundo escalón
		Escalón 1	-1	
		Escalón 2	-0.1	

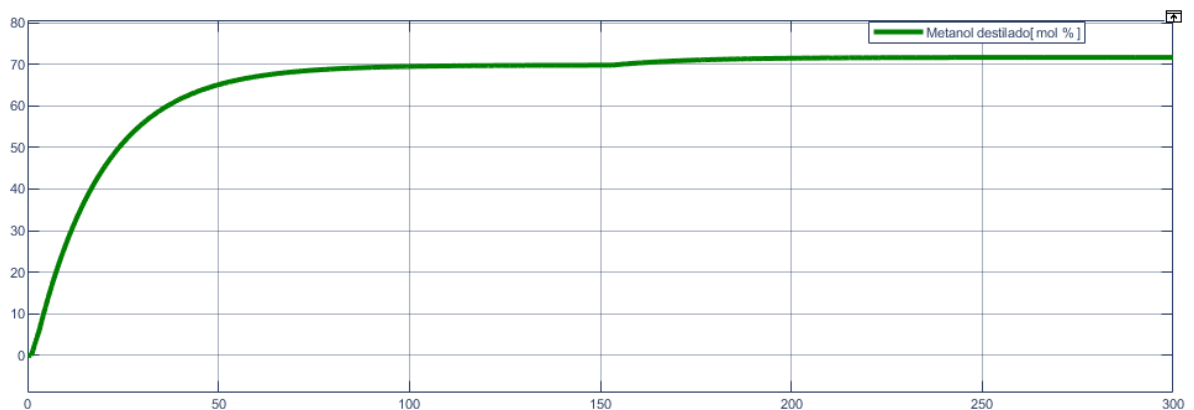
La respuesta del proceso 2 ante los dos escalones de entrada se muestra en la figura 53.

Figura 53. Respuesta en el tiempo de la variable 2 ante doble escalón aplicado en la entrada 2.



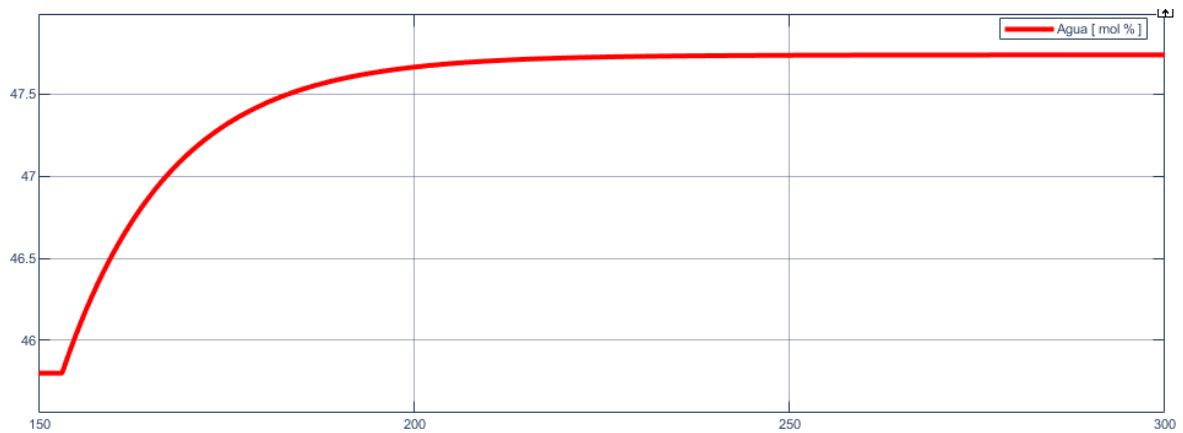
De igual forma la respuesta del proceso 1 ante los dos escalones de entrada se muestran en la figura 54. Se debe tener en cuenta que la respuesta después del segundo escalón muestra la dinámica que relaciona el proceso 1 con el proceso 2, por lo cual es usado para la identificación de G_{12} .

Figura 54. Respuesta en el tiempo de la variable 1 ante doble escalón aplicado en la entrada 2.



Con el fin de identificar la función de transferencia del proceso 2 correspondiente a G_{22} se extrae la información de la respuesta una vez aplicado el segundo escalón en la entrada 2, en este caso a partir de $t = 150$. Como se muestra en la figura 55.

Figura 55. Respuesta del proceso 2 para la identificación de G22(s).



Aplicando el método de identificación de los dos puntos de Smith.

- Cálculo de la ganancia estática:

$$K = \frac{47.74 - 45.79}{-1.1 - (-1)} = -19.5 \quad (77)$$

- Respuesta al 63.2%:

$$Y_{1_{63.2\%}} = ((47.74 - 45.79) * 0.632) + 45.79 = 47.0224 \quad (78)$$

- Respuesta al 28.3%:

$$Y_{1_{28.3\%}} = (47.74 - 45.79) * 0.283 + 45.79 = 46.3419 \quad (79)$$

- Tiempo 63.2%:

$$t_{63.2\%} = 167.9 - 150 = 17.9 \quad (80)$$

- Tiempo 28.3%:

$$t_{28.3\%} = 157.8 - 150 = 7.8 \quad (81)$$

- Constante de tiempo:

$$\tau = 1.5(17.9 - 7.8) = 15.1 \quad (82)$$

- Tiempo muerto:

$$t_m = 17.9 - 15.1 = 2.8 \quad (83)$$

Con base en los porcentajes de la salida y la gráfica de respuesta de la salida 2 se obtiene los tiempos para el cálculo de la constante de tiempo y el tiempo muerto del proceso 2, como se muestra en la figura 56.

Figura 56. Ubicación de los dos puntos para la identificación de $G_{22}(s)$.

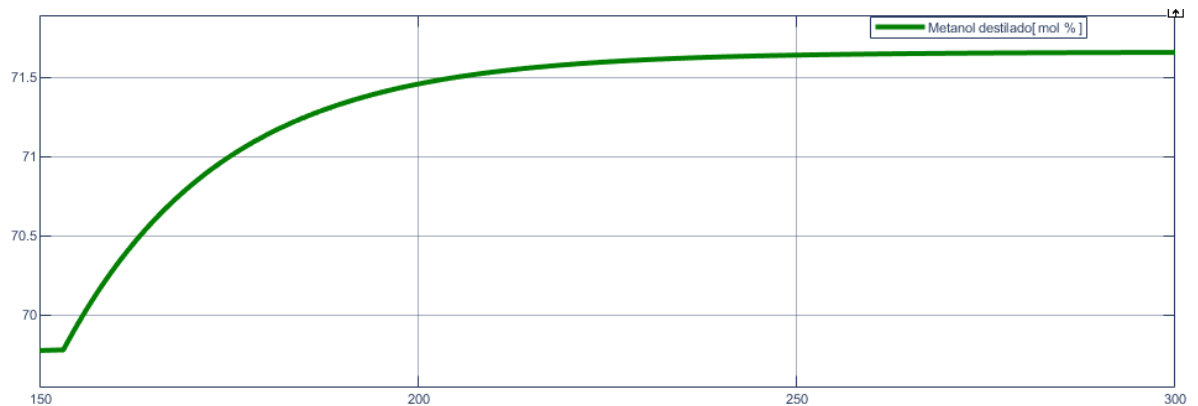


Este último gráfico muestra la dinámica del proceso 2 y con base en dicha información se tiene que el proceso está dado por la función de transferencia:

$$G_{22}(s) = \frac{-19.5}{15.1s + 1} e^{-2.8s} \quad (84)$$

De igual forma se realiza para la identificación de la función de transferencia de interacción de proceso 2 sobre el proceso 1, es decir, G_{12} . Se extrae la información de la salida Y1 desde el momento de aplicación del segundo escalón, como muestra la siguiente figura 57.

Figura 57. Respuesta del proceso 1 para la identificación de G12(s).



Aplicando el método de identificación de los dos puntos de Smith.

- Cálculo de la ganancia estática:

$$K = \frac{71.66 - 69.76}{-1.1 - (-1)} = -19 \quad (85)$$

- Respuesta al 63.2%:

$$Y_{1_{63.2\%}} = ((71.66 - 69.76) * 0.632) + 69.76 = 70.9608 \quad (86)$$

- Respuesta al 28.3%:

$$Y_{1_{28.3\%}} = ((71.66 - 69.76) * 0.283) + 69.76 = 70.2977 \quad (87)$$

- Tiempo 63.2%:

$$t_{63.2\%} = 174.1 - 150 = 24.1 \quad (88)$$

- Tiempo 28.3%:

$$t_{28.3\%} = 160.1 - 150 = 10.1 \quad (89)$$

- Constante de tiempo:

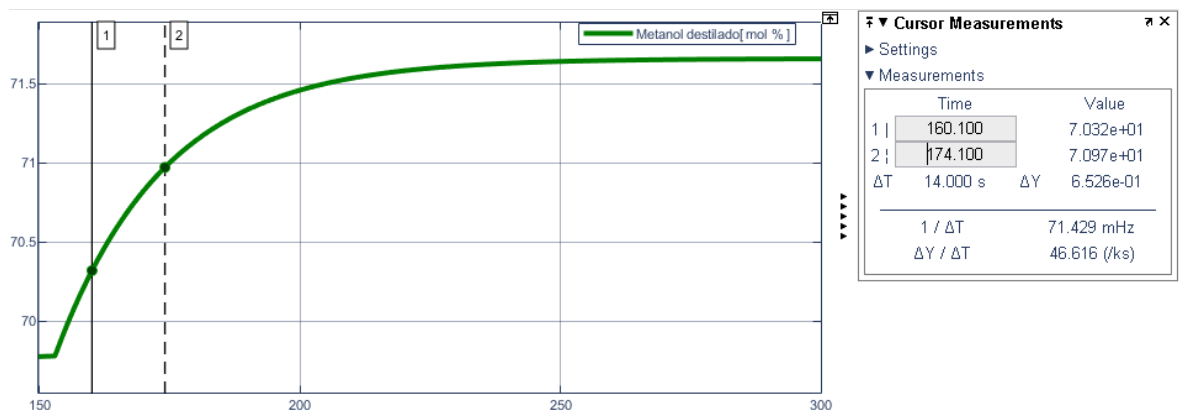
$$\tau = 1.5(24.1 - 10.1) = 21 \quad (90)$$

- Tiempo muerto:

$$t_m = 24.1 - 21 = 3.1 \quad (91)$$

Con base en los porcentajes de la salida y la gráfica de respuesta de la salida 1 se obtiene los tiempos para el cálculo de la constante de tiempo y el tiempo muerto de la interacción del proceso 2 sobre el proceso 1, como se muestra en la figura 58.

Figura 58. Ubicación de los dos puntos para la identificación de $G_{12}(s)$.

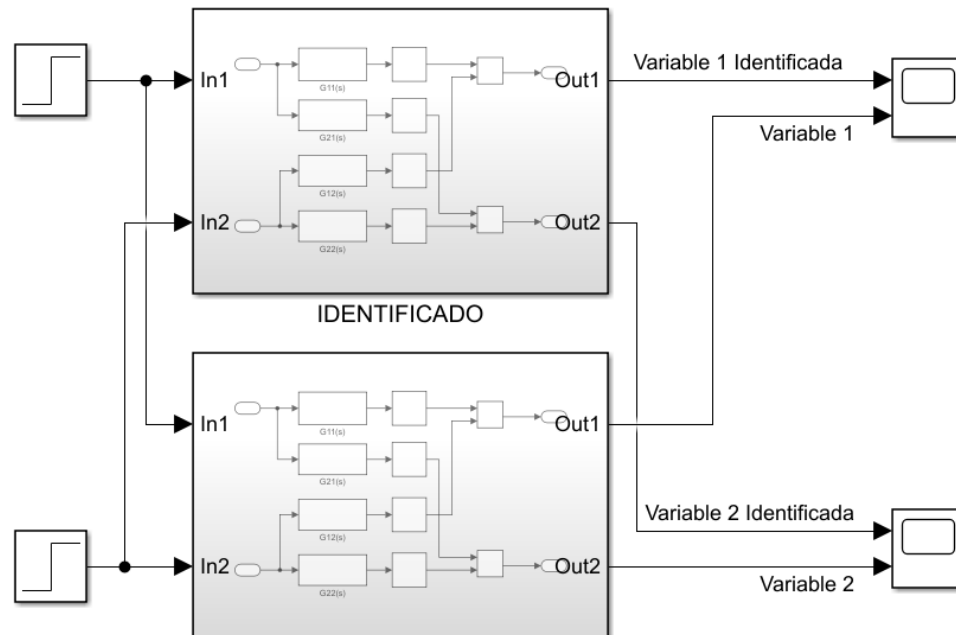


Este último gráfico muestra la dinámica del proceso 2 sobre el proceso 1 y con base en dicha información se tiene que la interacción está dada por la función de transferencia:

$$G_{12}(s) = \frac{-19}{21s + 1} e^{-3.1s} \quad (92)$$

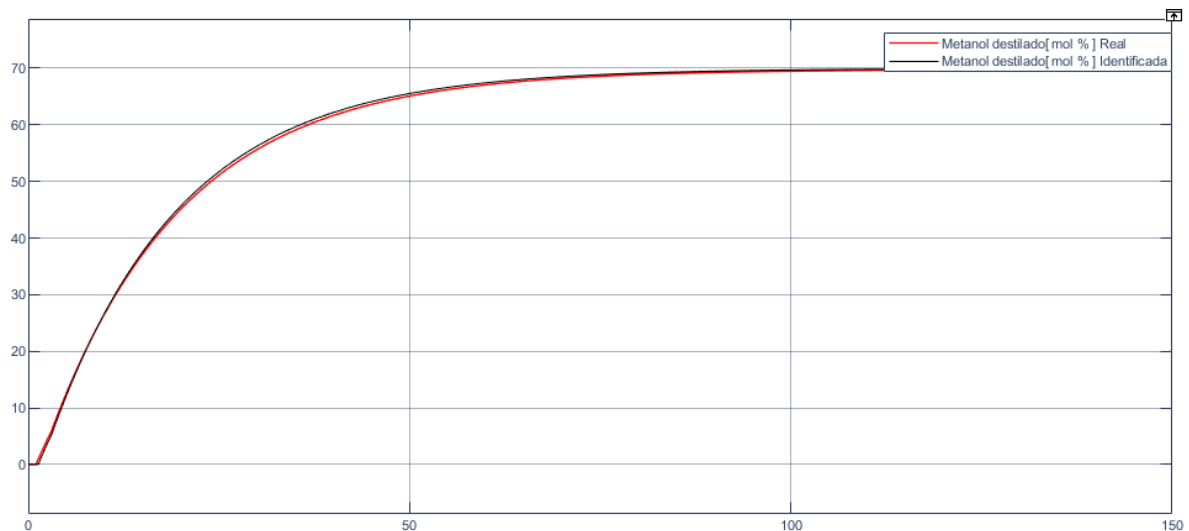
Con el fin de validar que la identificación de los procesos es acertada y que no hay fluctuación excesiva con respecto al sistema real se plantea el diagrama en bloques de la figura 59.

Figura 59. Diagrama en bloques comparación sistema real y sistema identificado.



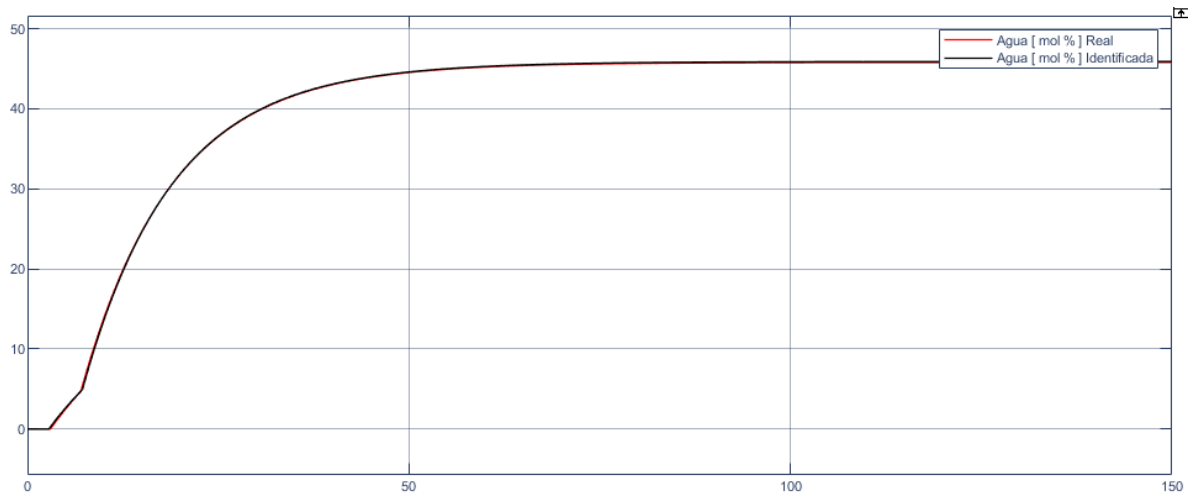
La figura 60 muestra la comparación entre la salida del sistema real y la salida del sistema identificado para la variable 1.

Figura 60. Comparación de la variable 1 real e identificada.



De igual forma, en la figura 61 se muestra la comparación entre la salida del sistema real y la salida del sistema identificado para la variable 2.

Figura 61. Comparación de la variable 2 real e identificada.



5.3 PASO 2: HASTA ESTE PUNTO SE DEBEN TENER IDENTIFICADAS LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LAS VARIABLES 1 Y 2, ADEMÁS DE LAS RESPECTIVAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE INTERACCIÓN DE LAS MISMAS. CON DICHA INFORMACIÓN ES POSIBLE CALCULAR LA MALLA DE DESACOPLE PARA EL CONTROL MULTIVARIABLE.

Una característica de las funciones de transferencia identificadas es el tiempo muerto que estas poseen, para efectos de control y cálculo de la malla de desacople se aplica la aproximación de Taylor para el tiempo muerto como un sistema de primer orden con ganancia estática unitaria y constante de tiempo igual al tiempo muerto, es decir:

$$t_0 = \frac{1}{t_m s + 1} \quad (93)$$

Aplicando la aproximación de Taylor las funciones de transferencia Ecu (94),(95),(96) y (97) resultan ser.

$$G_{11}(s) = \left(\frac{12.75}{16s + 1} \right) \left(\frac{1}{1.3s + 1} \right) = \frac{12.75}{20.8s^2 + 17.3s + 1} \quad (94)$$

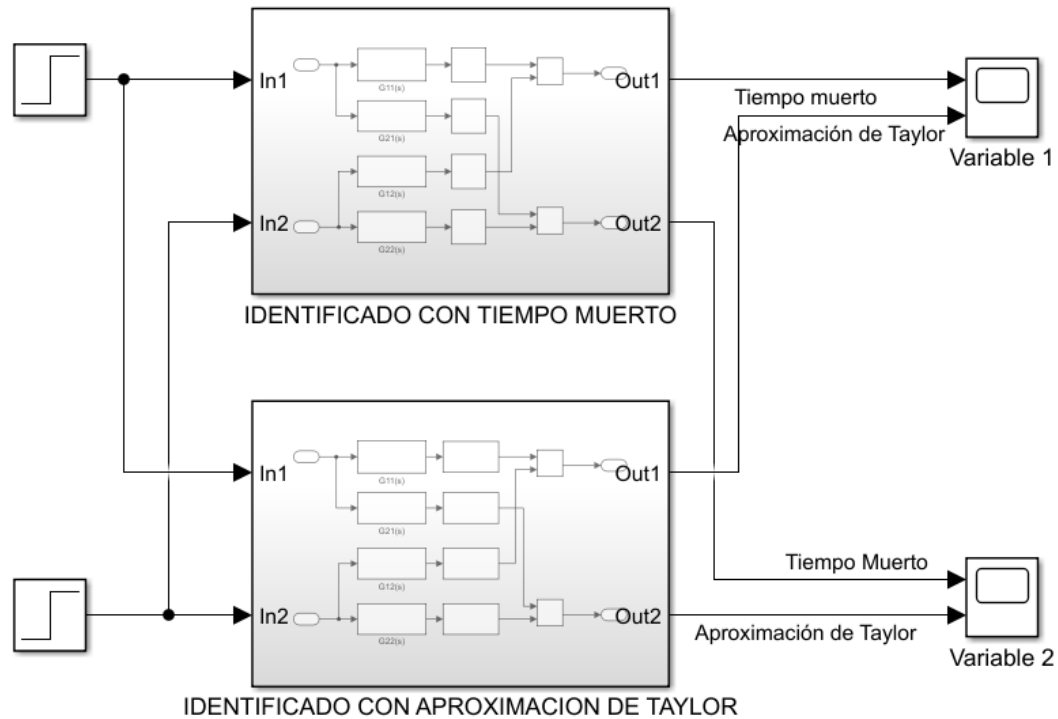
$$G_{12}(s) = \left(\frac{-19}{21s + 1} \right) \left(\frac{1}{3.1s + 1} \right) = \frac{-19}{65.1s^2 + 24.1s + 1} \quad (95)$$

$$G_{22}(s) = \left(\frac{-19.5}{15.1s + 1} \right) \left(\frac{1}{2.8s + 1} \right) = \frac{-19.5}{42.28s^2 + 17.9s + 1} \quad (96)$$

$$G_{21}(s) = \left(\frac{6.6}{10.5s + 1} \right) \left(\frac{1}{7.2s + 1} \right) = \frac{6.6}{75.6s^2 + 17.7s + 1} \quad (97)$$

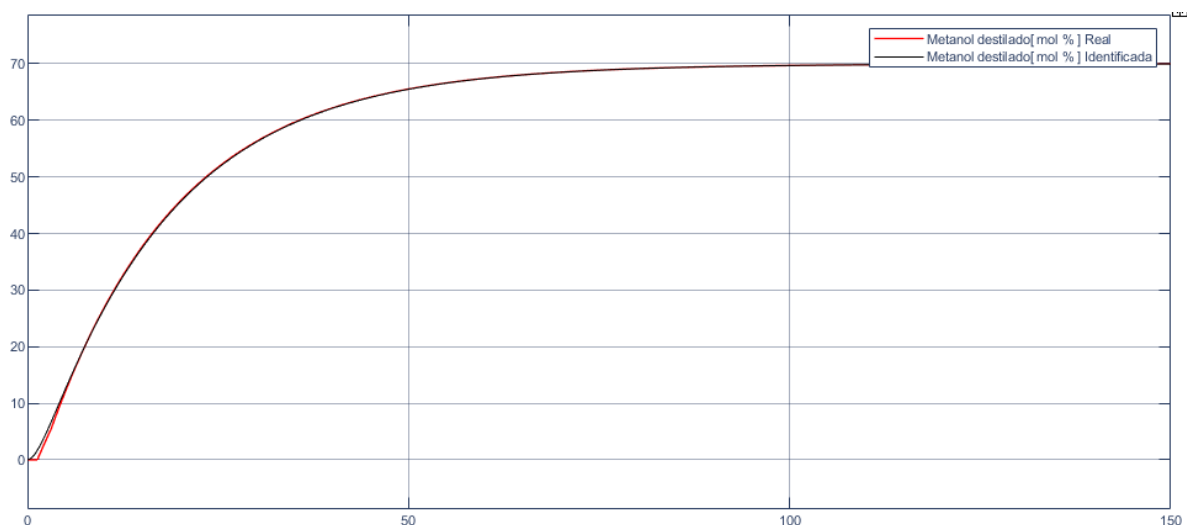
Para la demostración de la equivalencia del tiempo muerto en un sistema lineal, Se realiza por medio de la figura 62.

Figura 62. Diagrama en bloques de comparación entre sistema identificado con tiempo muerto y sistema identificado con aproximación de Taylor



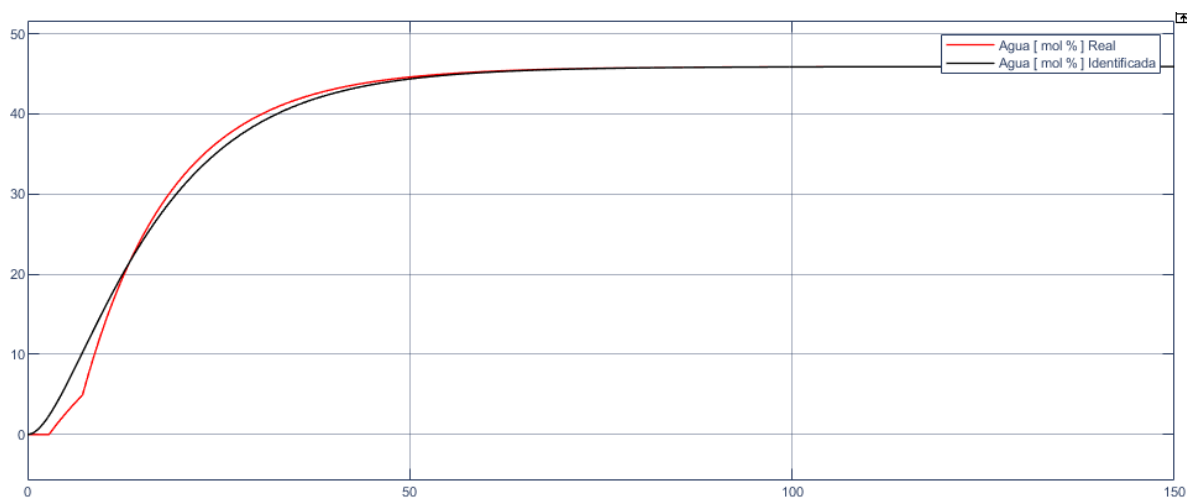
La respuesta para la variable 1 de la comparación haciendo uso del tiempo muerto y la aproximación de Taylor se muestra en la figura 63.

Figura 63.Comparación con tiempo muerto y aproximación de Taylor para la variable 1.



De la misma manera, se demuestra la similitud de las señales con la comparación de la variable 2 (Ver figura 64).

Figura 64.Comparación con tiempo muerto y aproximación de Taylor para la variable 2.



Tener en cuenta que la malla de desacople se compone de D_{12} y D_{21} .

$$D_{12} = \frac{-\frac{19}{65.1s^2 + 24.1 + 1}}{\frac{12.75}{20.8s^2 + 17.3s + 1}} = \left(\frac{19}{12.75}\right) \left(\frac{20.8s^2 + 17.3s + 1}{65.1s^2 + 24.1 + 1}\right) \quad (98)$$

$$D_{21} = \frac{-\frac{6.6}{75.6s^2 + 17.7s + 1}}{\frac{-19.5}{42.28s^2 + 17.9s + 1}} = \left(\frac{6.6}{19.5}\right) \left(\frac{42.28s^2 + 17.9s + 1}{75.6s^2 + 17.7s + 1}\right) \quad (99)$$

Al encontrar las funciones de transferencia de la malla de desacople se debe de verificar que los sistemas se comporten como dos sistemas SISO. En la figura 65 se realizó la primera prueba de funcionamiento de la malla en donde se busca que la interacción del proceso 1 con el proceso 2 sea nula, se ingresa en la entrada 1 un escalón y en la entrada 2 un cero.

Figura 65. Diagrama de bloques para probar el funcionamiento de la malla en el proceso 1

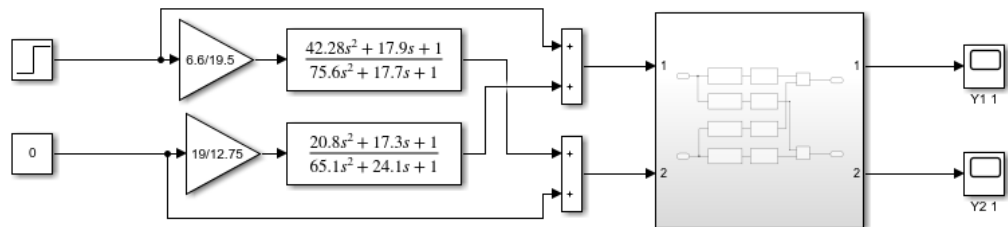


Figura 66. Respuesta obtenida en la salida 1 al aplicar un escalon en la entrada 1

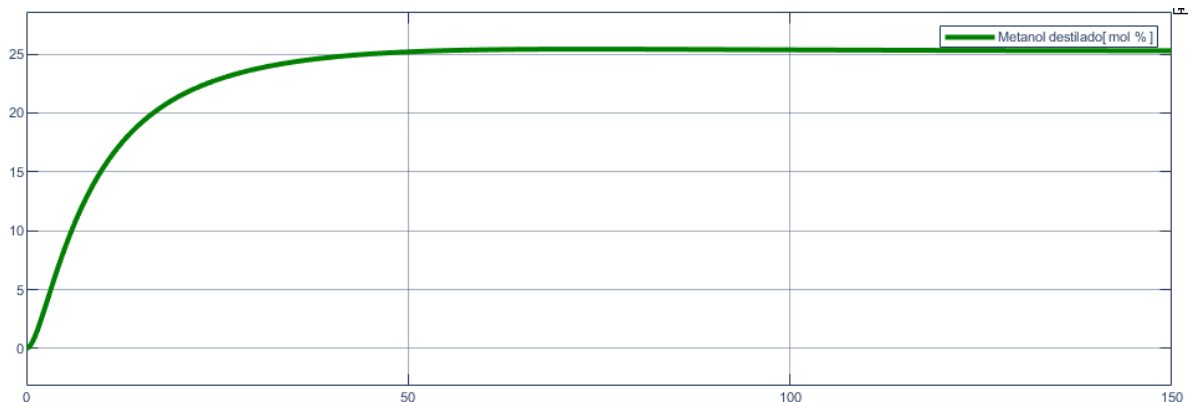
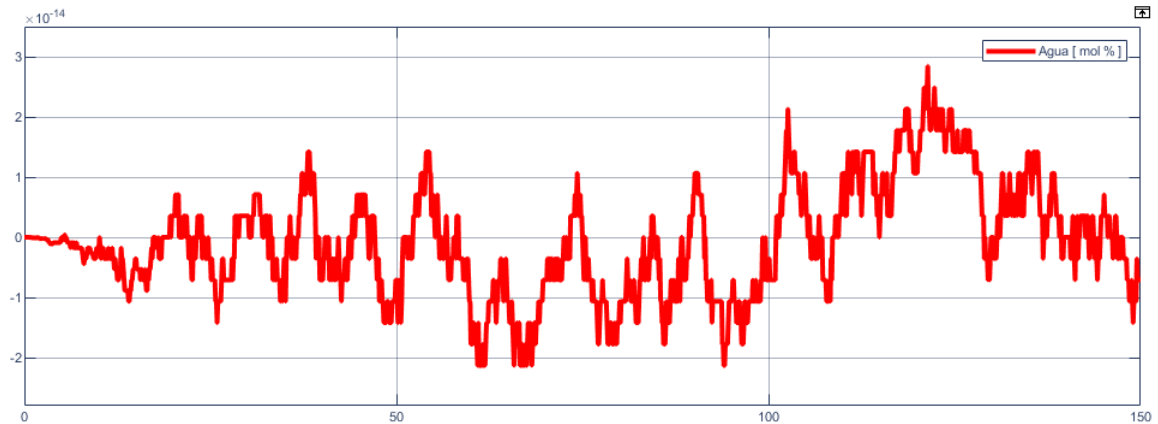


Figura 67. Respuesta obtenida en la salida 2 aplicar un escalon en la entrada 1



En la figura 68 se realiza la segunda prueba de funcionamiento de la malla en donde se busca que la interacción del proceso 2 con el proceso 1 sea nula, se ingresa en la entrada 2 un escalón y en la entrada 1 un cero.

Figura 68. Diagrama de bloques para probar el funcionamiento de la malla en el proceso 2

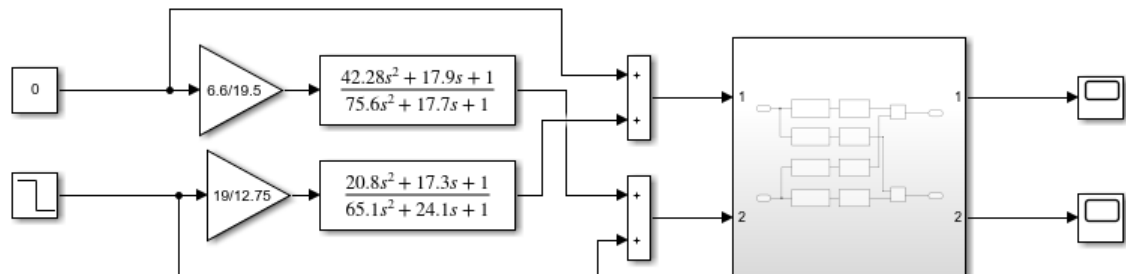


Figura 69. Respuesta obtenida en la salida 2 al aplicar un escalón en la entrada 2

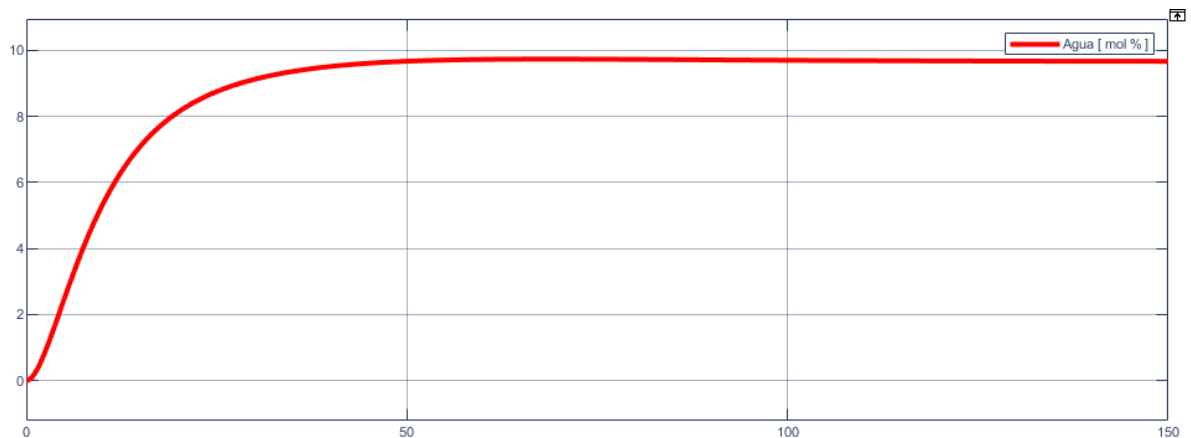


Figura 70. Respuesta obtenida en la salida 2 al aplicar un escalón en la entrada 2



Al implementar el desacople en la columna identificada podemos ver que el comportamiento de las interacciones (figura 70 y 67) son prácticamente nulas o se aproximan a cero, es decir que la columna que tenía un comportamiento de un sistema MIMO al aplicar la malla de desacople se convirtió en dos sistemas SISO por lo tanto si se recrea los comportamientos de las figuras 66 y 69 al aplicar los escalones aplicados anteriormente a las entradas, sin la malla la columna no mostraría estas respuestas.

5.4 PASO 3: SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES PARA G_{11} Y G_{22} .

Gracias al desarrollo de la malla de desacople se pueden sintonizar los controladores para los procesos de forma independiente con base en el modelo representado por la función de transferencia. Para la sintonización de los controladores se tiene como referencia las ecuaciones del método de Ziegler & Nichols.



$$K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} \quad (100)$$

$$\tau_i = 2t_0 \quad (101)$$

$$\tau_d = \frac{1}{2} t_0 \quad (102)$$

5.4.1 Paso3.1 Sintonización del controlador para G11(s).

Aplicando las ecuaciones para el cálculo de los parámetros del controlador se tiene que:

$$G_{11}(s) = \frac{12.75}{16s + 1} e^{-1.3s} \quad (103)$$

$$K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} = \frac{1.2}{12.75} \left(\frac{1.3}{16} \right)^{-1} = 1.158 \quad (104)$$

$$\tau_I = 2t_0 = 2(1.3) = 2.6 \quad (105)$$

$$\tau_D = \frac{1}{2} t_0 = \frac{1}{2} (1.3) = 0.65 \quad (106)$$

$$K_D = K_c * \tau_D = 1.158 * 0.65 = 0.75 \quad (107)$$

$$K_i = \frac{K_c}{\tau_I} = \frac{1.158}{2.6} = 0.44 \quad (108)$$

En la figura 71 se muestra el diagrama en bloques del lazo de control para la variable 1.



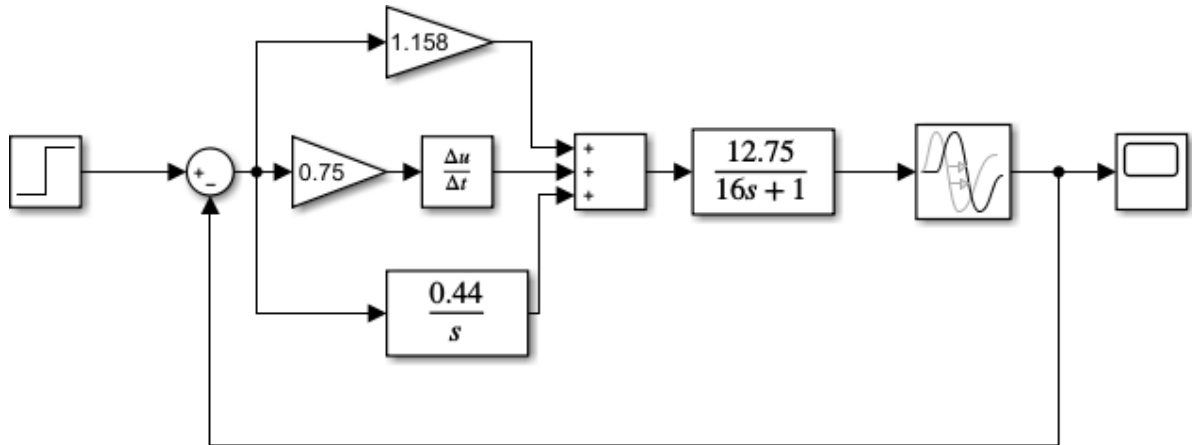
SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

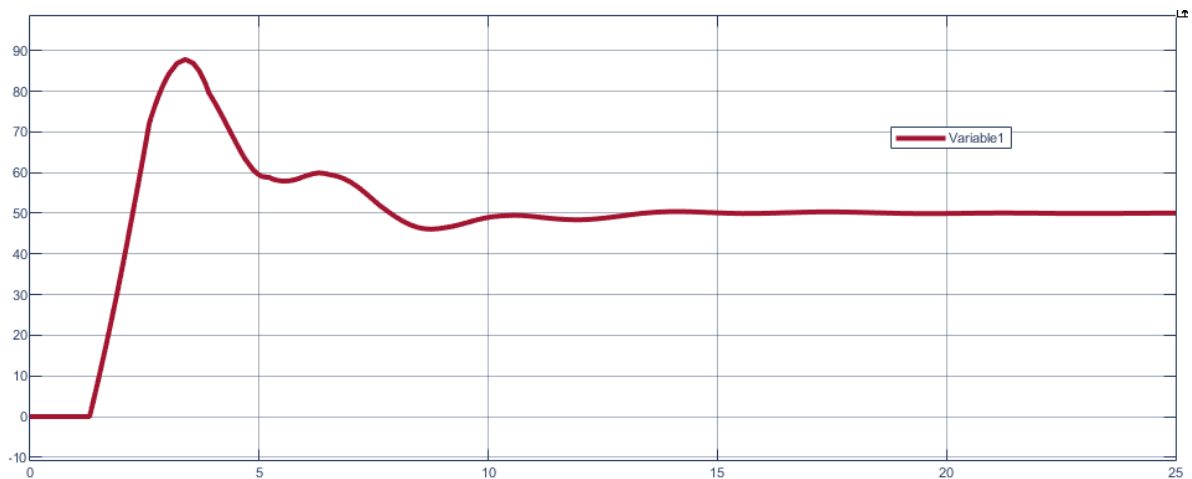
Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Figura 71 Diagrama en bloques del lazo de control de $G_{11}(s)$.



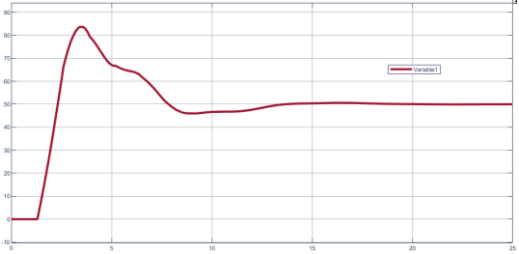
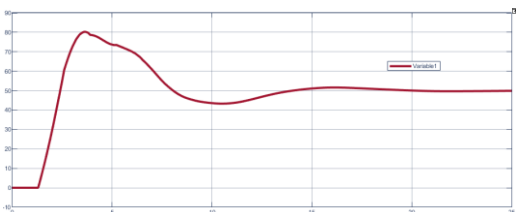
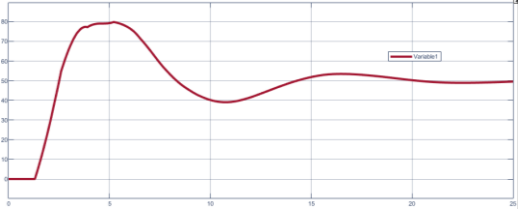
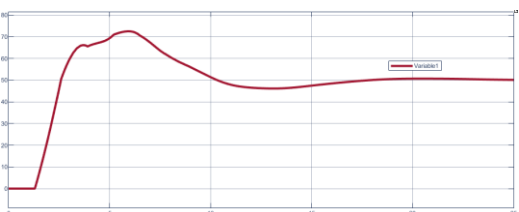
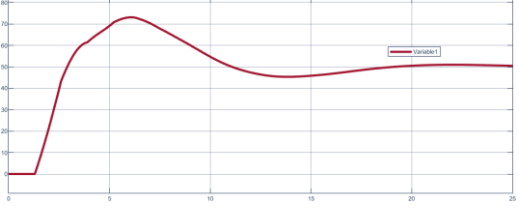
Para un setpoint de 50 para la variable 1 se obtiene la primera respuesta a lazo cerrado con el controlador sintonizado.

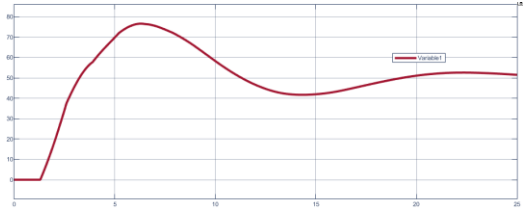
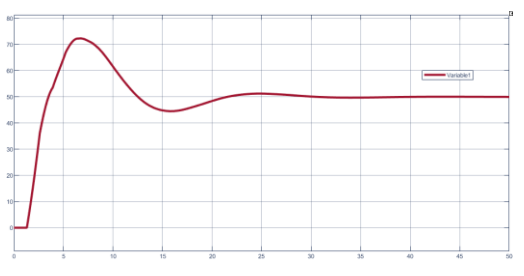
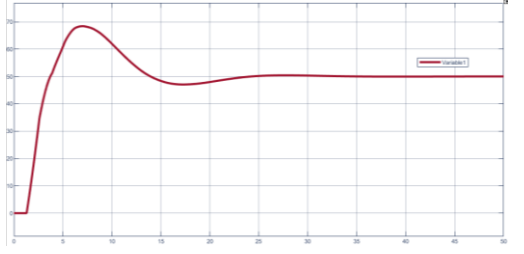
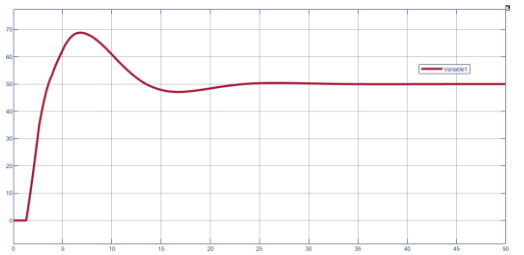
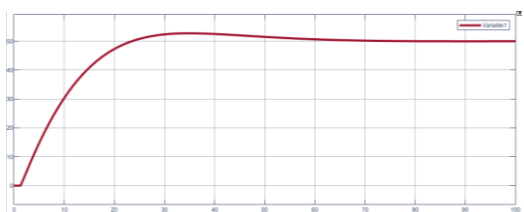
Figura 72 Respuesta del lazo cerrado para la variable 1.



Como muestra la figura 72, la salida presenta sobre impulso mayor al 10% del valor de referencia, por lo tanto, es necesario realizar un ajuste al controlador y así mejorar los márgenes de respuesta transitoria y permanente. Las variaciones y el análisis de cambio se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Ajuste del controlador PID de $G_{11}(s)$

Ajuste	Análisis	Respuesta
Reducción del 10% de K_c	La respuesta obtenida inicialmente presenta sobre impulso, con el fin de reducir dicho efecto se disminuye el parámetro proporcional.	
Reducción del 10% de K_c	El sobre impulso reflejado en la respuesta sigue siendo elevado.	
Reducción del 10% de K_c	El sobre impulso reflejado en la respuesta sigue siendo elevado.	
Reducción del 30% de K_i	Disminución del sobre impulso y la amplitud de las oscilaciones en la respuesta.	
Reducción del 10% de los tres parámetros del controlador	Respuesta abrupta.	

Reducción del 10% de K_c	El sobre impulso reflejado en la respuesta sigue siendo elevado.	
Reducción del 10% de K_i	Oscilaciones en la respuesta producidas por el efecto integral del controlador.	
Reducción del 10% de K_i y K_d	El sobre impulso reflejado en la respuesta sigue siendo elevado.	
Reducción del 10% de K_d	El sobre impulso reflejado en la respuesta sigue siendo elevado.	
Reducción de K_i	El sobre impulso reflejado en la respuesta sigue siendo elevado.	

Resultado del ajuste del controlador para $G_{11}(s)$ se tiene que $K_c = 0.1$, $K_i = 0.01$ y $K_d = 0$. Además, el sobre impulso obtenido en el último ajuste es inferior al 10% del valor de referencia.

5.4.2 Paso3.2 Sintonización del controlador para $G_{22}(s)$.

Aplicando las ecuaciones para el cálculo de los parámetros del controlador se tiene que:

$$G_{22}(s) = \frac{-19.5}{15.1s + 1} e^{-2.8s} \quad (109)$$

$$K_C = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1} = \frac{1.2}{-19.5} \left(\frac{2.8}{15.1} \right)^{-1} = -0.33 \quad (110)$$

$$\tau_I = 2t_0 = 2(2.8) = 5.6 \quad (111)$$

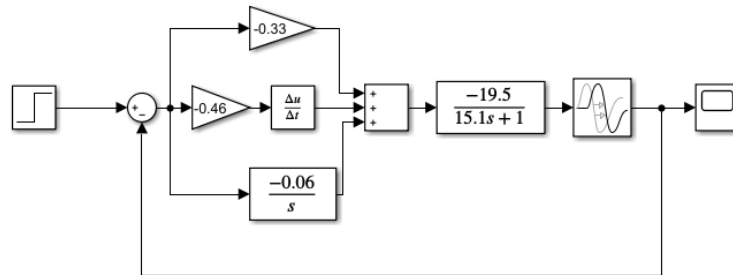
$$\tau_D = \frac{1}{2} t_0 = \frac{1}{2} (2.8) = 1.4 \quad (112)$$

$$K_D = K_C * \tau_D = -0.33 * 1.4 = -0.46 \quad (113)$$

$$K_i = \frac{K_C}{\tau_I} = \frac{-0.33}{5.6} = -0.06 \quad (114)$$

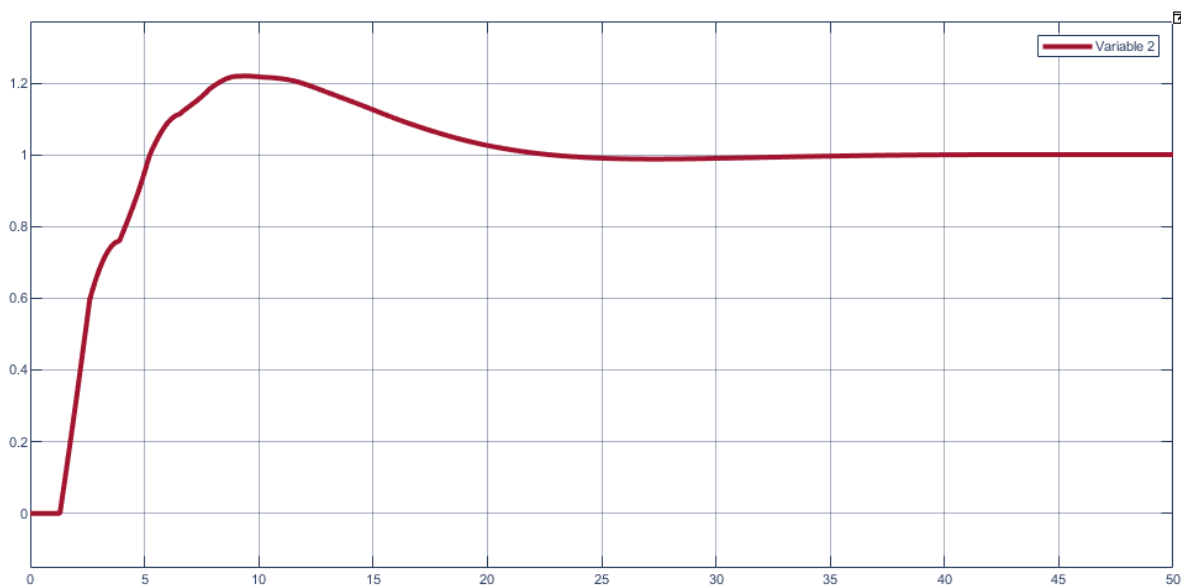
El controlador obtenido anteriormente tiene componentes negativas debido a la naturaleza del fenómeno a controlar y si estos tomaran un valor positivo harían imposible el control del sistema (solo se tendrían dos resultados el infinito y el menos infinito sin importar que setpoint le indiquemos). En la figura 73 se muestra el diagrama en bloques del lazo de control para la variable 2.

Figura 73 Diagrama en bloques del lazo de control de $G_{22}(s)$.



Para un setpoint de 1 para la variable 1 se obtiene la primera respuesta a lazo cerrado con el controlador sintonizado (Ver figura 74).

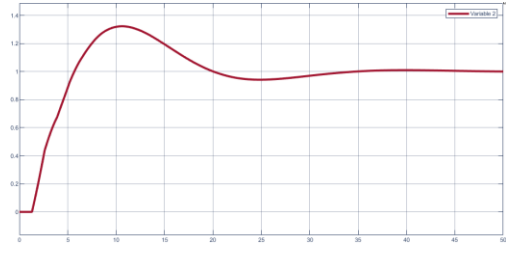
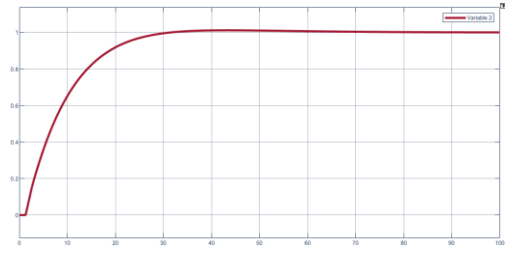
Figura 74 Respuesta del lazo cerrado para la variable 2.



Como muestra la figura anterior, la salida presenta sobre impulso mayor al 10% del valor de referencia, por lo tanto, es necesario realizar un ajuste al controlador y así mejorar los márgenes de respuesta transitoria y permanente. Las variaciones y el análisis de cambio se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Ajuste del controlador PID de $G_{22}(s)$.

Ajuste	Análisis	Respuesta
Aumento hacia el cero 10% de K_d y K_c	Respuesta abrupta con sobre impulso.	
Aumento hacia el cero 10% de K_d y K_c	Respuesta abrupta con sobre impulso y oscilaciones.	

Aumento hacia el cero 10% de K_c	Respuesta con oscilaciones.	
Aumento hacia el cero 10% de K_i	El sobre impulso en la respuesta es menor al 5%.	

Resultado del ajuste del controlador para $G_{22}(s)$ se tiene que $K_c = -0.09$, $K_i = -0.006$ y $K_d = -0.12$.

5.5 PASO 4: ARMAR EL LAZO DE CONTROL MULTIVARIABLE

Teniendo los controladores sintonizados y ajustados, se procede a construir el lazo de control multivariable. En la figura 75 se plasma el lazo de control, en la Figura 76 se muestra la respuesta de la variable uno ante un Setpoint de 50 y en la figura 77 la respuesta de la variable 2 ante un Setpoint de 1.

Figura 75 Diagrama en bloques del lazo de control multivariable.

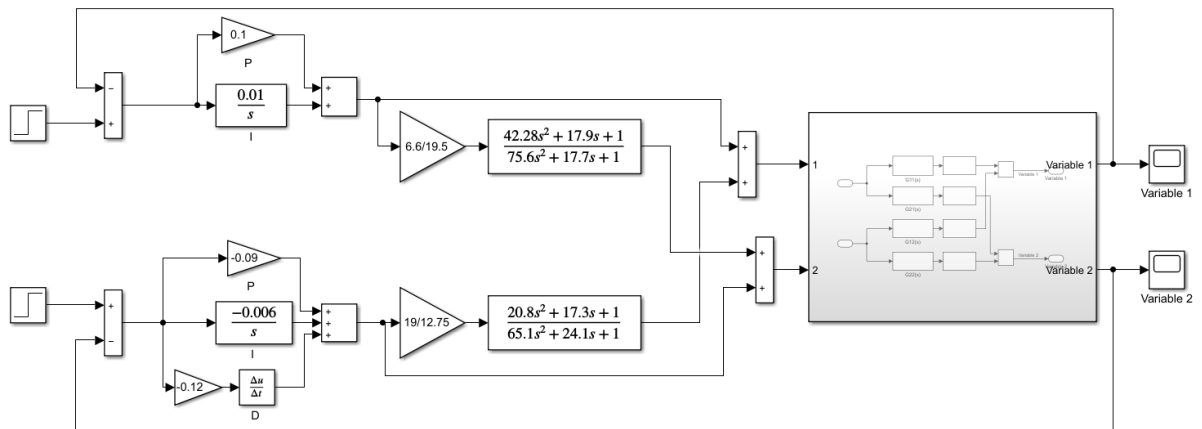


Figura 76 Respuesta de la variable 1 para un setpoint de 50.

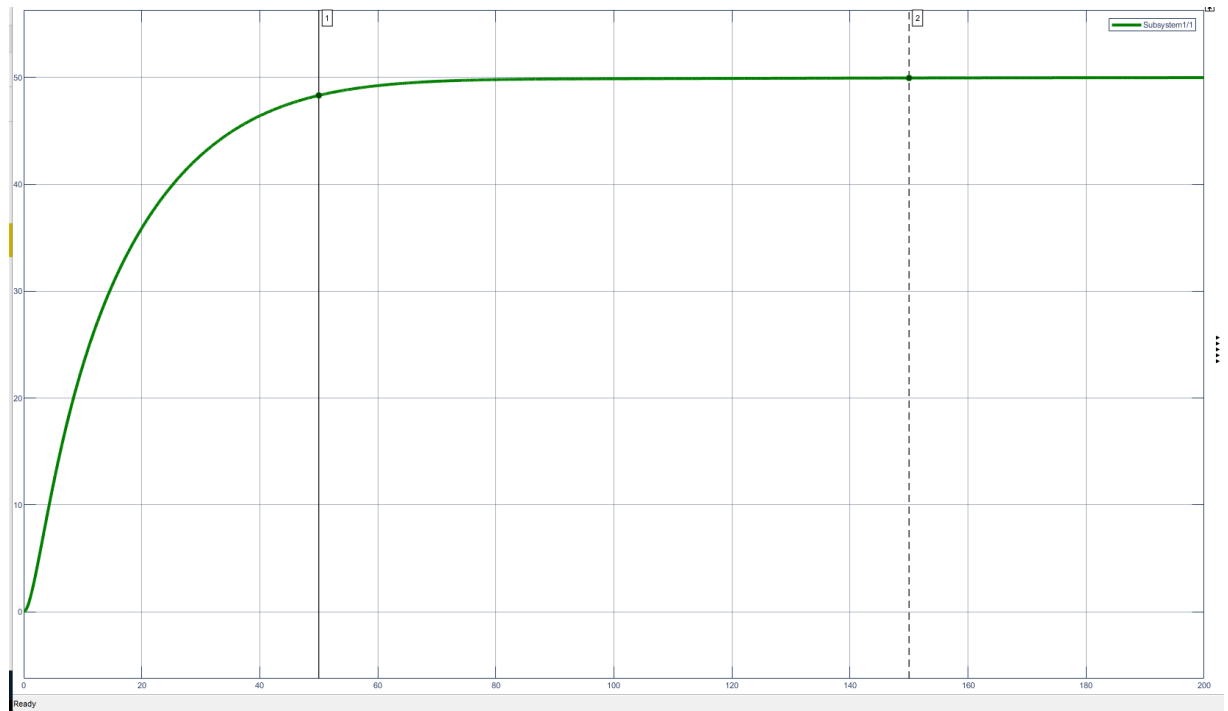
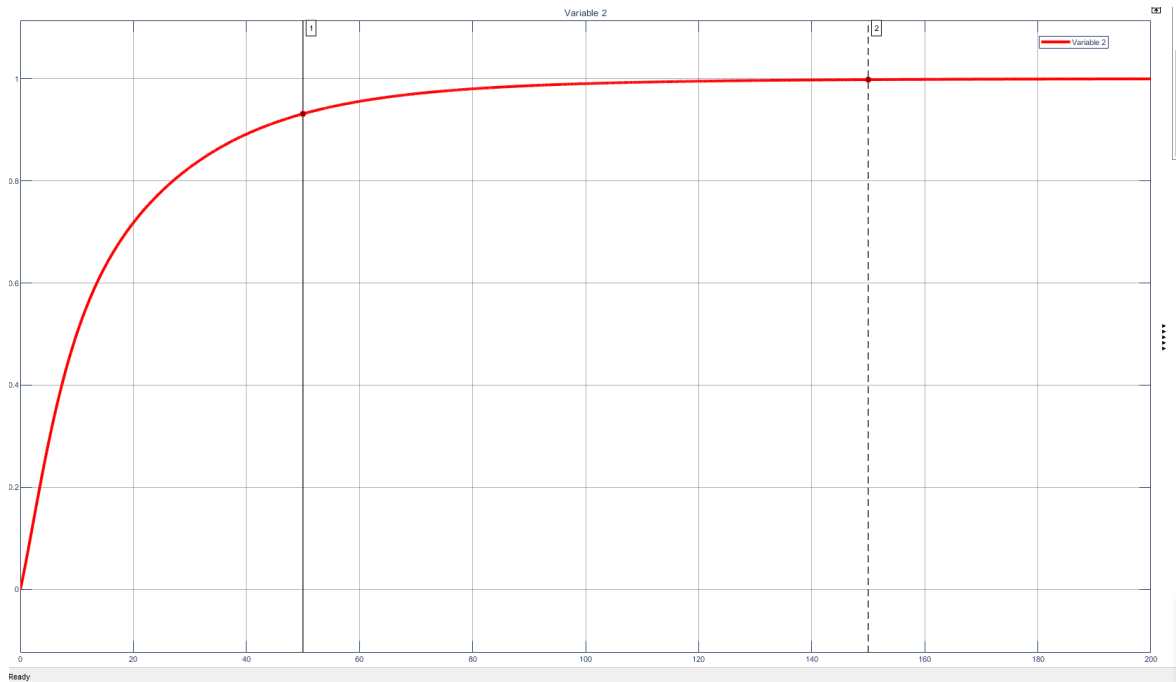


Figura 77 Respuesta de la variable 2 para un setpoint de 1.

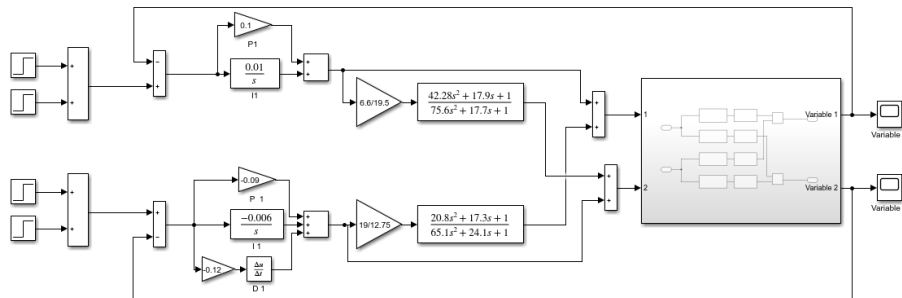


5.6 PASO 5: VISUALIZACIÓN DE LA SEGUNDA PROYECCIÓN

En las simulaciones realizadas anteriormente a simple vista se puede notar el efecto de la malla de desacople, donde las variaciones del setpoint de una variable no influyen en la otra variable controlada.

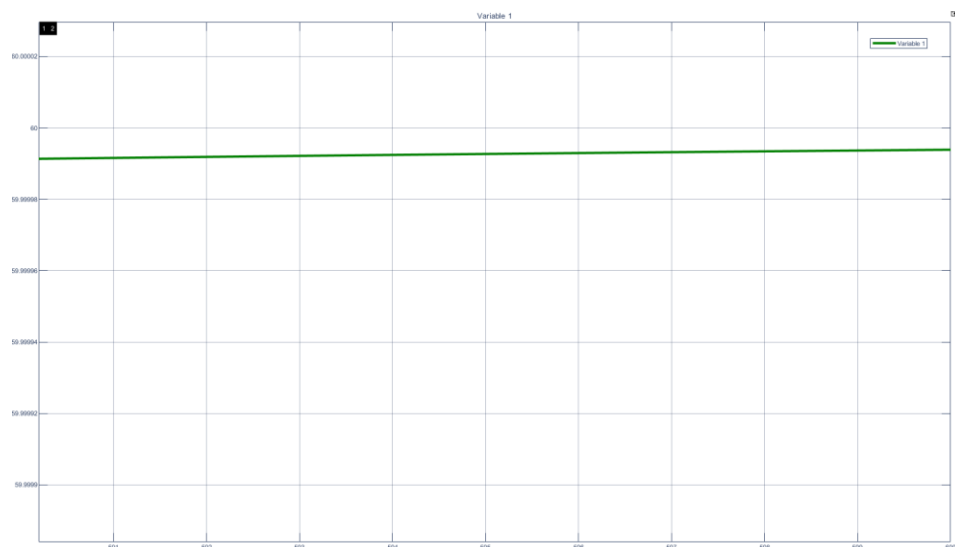
Para validar este hecho se analiza la segunda proyección de la salida en ambos casos, aumentando el setpoint para la variable 1 un 20 % y para la variable 2 igual ambos segundos setpoint son aplicados a los 200s. En la figura 78 se muestra el diagrama para comprobar la segunda proyección en cada una de las variables.

Figura 78 Diagrama de bloques para visualizar la segunda proyección.



En la Figura 79 se muestran las variaciones de la variable 2 en el tiempo debido a cambio de setpoint de la variable 1, donde las variaciones se muestran en el orden de las micras.

Figura 79 Influencia de la variable 1 sobre la variable 2



De igual forma en la figura 80 se muestra las variaciones de la variable 1 en el tiempo debido a cambio de setpoint de la variable 2, donde las variaciones se muestran en el orden de las micras

Figura 80 Influencia de la variable 2 sobre la variable 1



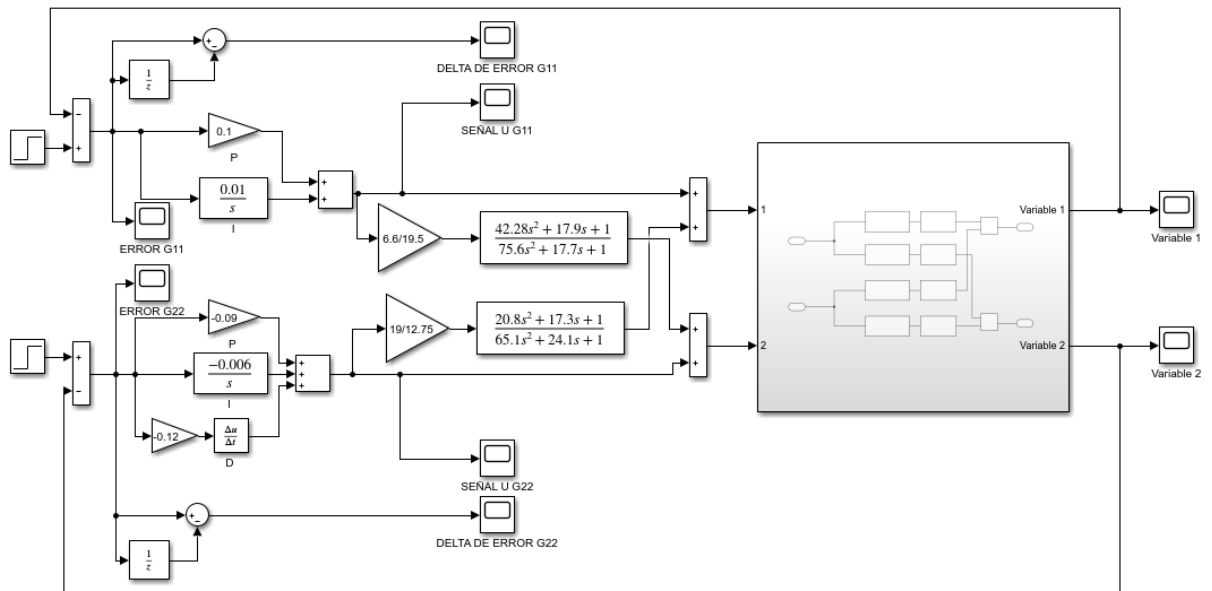
5.7 PASO 6: SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES $G_{11}(s)$ Y $G_{22}(s)$ CON LÓGICA DIFUSA.

En primera instancia para la sintonización de los controladores $G_{11}(s)$ y $G_{22}(s)$ con lógica difusa, se debe seleccionar que tipo de arquitectura difusa se desea aplicar a estos dos lazos de control, para ello se decide usar un control PD difuso.

- **Definición de los universos de discurso**

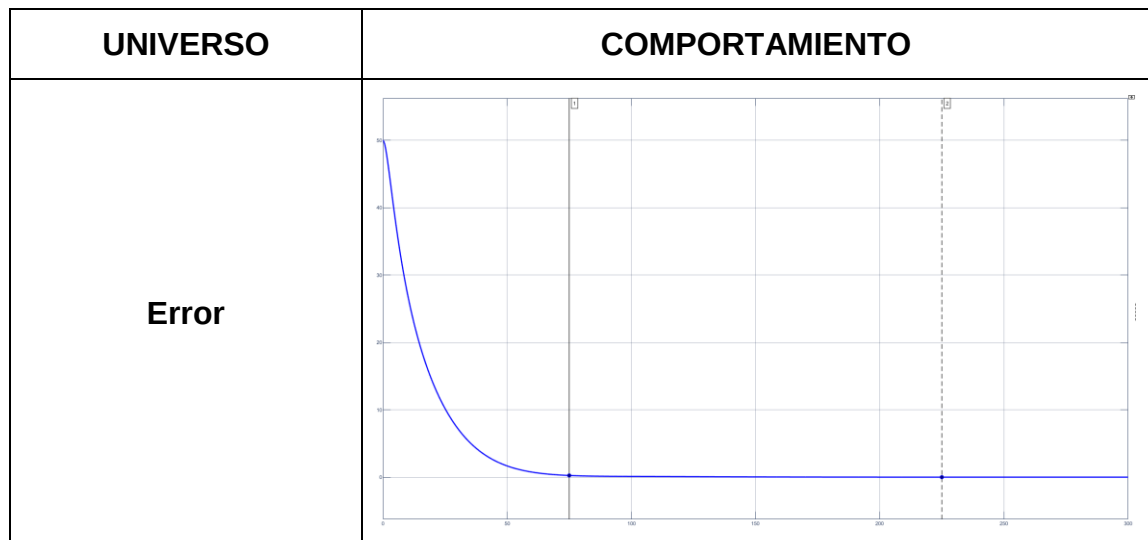
Como se plantea en el desarrollo de la estrategia los universos de discursos del controlador lógico difuso, basados en los controlados clásicos deben de contemplar como posibles 100 entradas al error, error acumulado y delta error y como salidas a la señal de control emitida por el controlador PID. En este caso particular se utiliza al error y delta error como entradas y para la salida es el rango en el que varía la señal de control. En la Figura 81 se muestra el diagrama de bloques del control multivariable con la captura de las entradas y salidas de los controladores lógicos difusos.

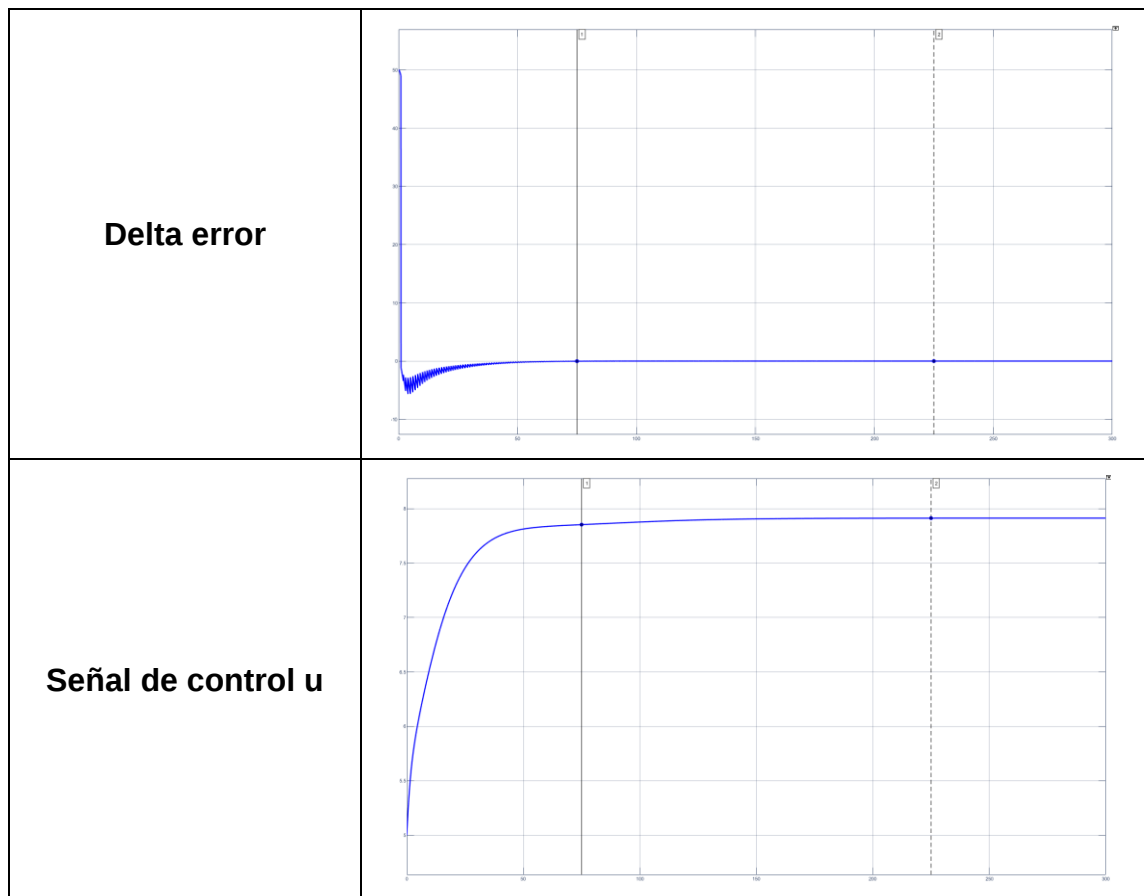
Figura 81 Lazo del proceso instrumentado contemplando el error, delta error y señal de control U de G11 y G22



En la Tabla 10 se observa los comportamientos de las entradas y salidas basados en el controlador $G_{11}(s)$.

Tabla 10 comportamiento de los universos de G_{11}

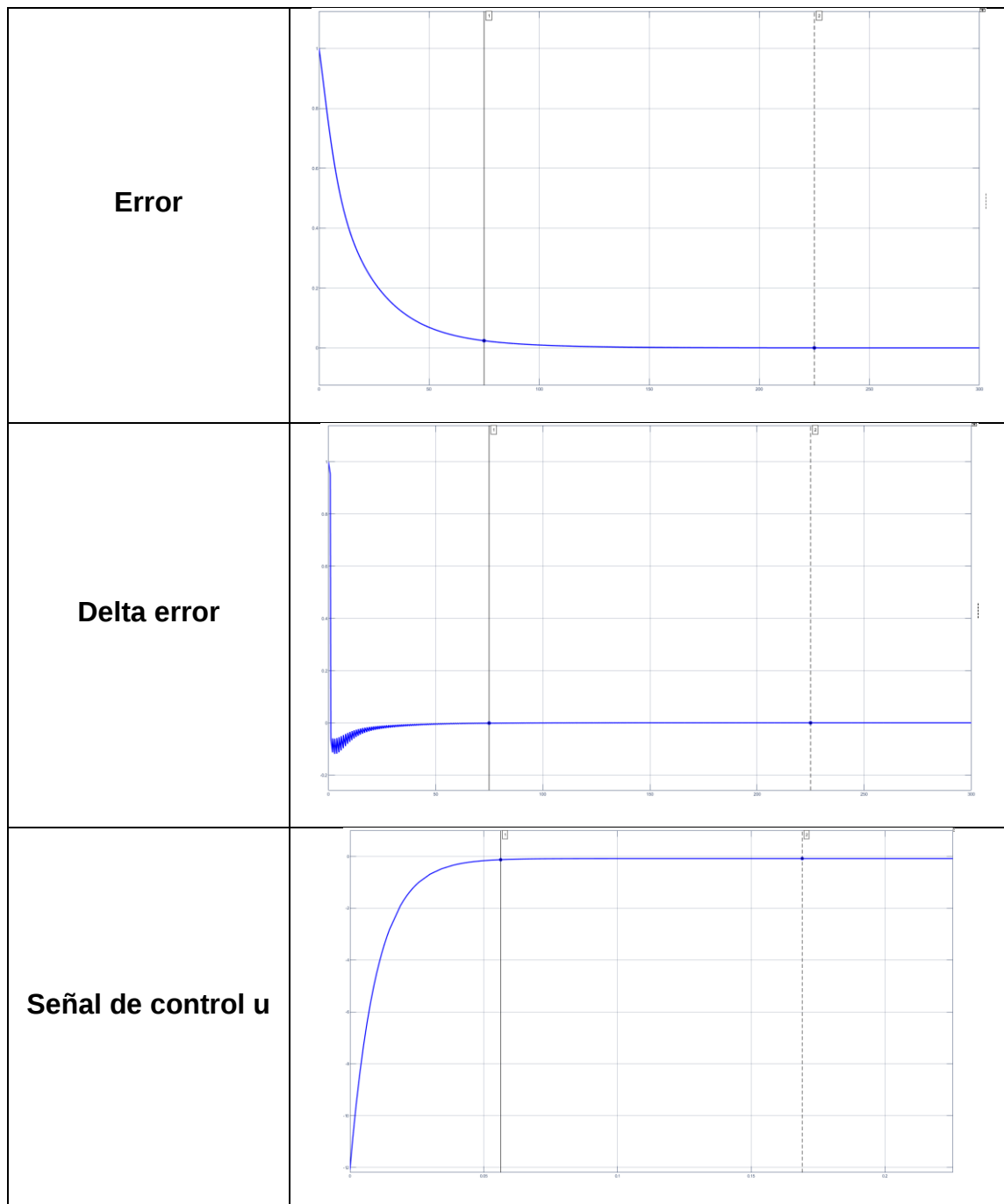




Y en la Tabla 11 se muestra el comportamiento de cada uno de los universos de la función $G_{22}(S)$.

Tabla 11 comportamiento de los universos de G_{22}

UNIVERSO	COMPORTAMIENTO
----------	----------------



- **Definición de las variables lingüísticas**

Para cada universo de discurso de $G_{11}(s)$ y $G_{22}(s)$ se utilizaron las mismas variables lingüísticas.



El error puede variar dependiendo cómo es su comportamiento ante la señal de control y el comportamiento de la planta. Por lo tanto, se para el universo de discurso error se definen cinco valores lingüísticos los cuales aplican de la misma manera para el delta error. Estos valores lingüísticos son:

- NEGATIVO GRANDE (NG)
- NEGATIVO PEQUEÑO (NP)
- CERO (C)
- POSITIVO PEQUEÑO (PP)
- POSITIVO GRANDE (PG)

Para la señal de control u se utilizan de igual manera cinco valores lingüísticos los cuales son:

- MUY BAJO (MB)
 - BAJO (B)
 - MEDIO (M)
 - ALTO (A)
 - MUY ALTO (MA)
- **Selección del tipo de controlador difuso a utilizar**

Para simplificar la información de los tipos de controladores difusos se consideraron los aspectos de que todas sus entradas se estabilizan en cero al llegar al setpoint, el controlador se mantiene ante ruido y perturbación.

Tabla 12. Tipos de controladores difusos

Tipo	Número de entradas	Robustez ante ruido y perturbación	Entradas estabilizadas en 0	Cantidad de reglas
------	--------------------	------------------------------------	-----------------------------	--------------------



P	1	No	Si	5
PI	2	Si	No	25
PD	2	Si	Si	25
PID	3	Si	No	125

Con la información de la tabla 12 se selecciona el controlador difuso tipo PD porque este es el único que cumple con los dos parámetros, se descartan los controladores PI y PID difuso porque toman diferentes valores de estabilización al variar el setpoint en la entrada de la integral del error lo que dificulta al momento del diseñar el fuzzy, el controlador P difuso al no mantener el setpoint ante el ruido y perturbación puede hacer que el controlador difuso no responda adecuadamente.

- Definición de los conjuntos difusos y funciones de membrecía**

Los conjuntos difusos estarán basados de acuerdo al comportamiento de cada figura expuesta en la tabla 10 para $G_{11}(s)$ y tabla 11 para $G_{22}(s)$ en conjunto con las variables lingüísticas, de igual manera las funciones de membrecía se establecerán de acuerdo a la relación de las entradas con respecto a la señal de control. Por último, el rango de control dependerá de los valores máximos y mínimos alcanzados en cada variable lingüística. Téngase en cuenta que para el delta error se descartan los primeros datos de la respuesta debido a que estos se encuentran fuera del contexto de la variable lingüística.

En la Tabla 13 se plasman los rangos de operación del universo con sus respectivas funciones de membrecía para el controlador $G_{11}(s)$.

Tabla 13 Datos del controlador $G_{11}(S)$ difuso



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Universe	Range of operation	Fuzzy sets with their membership functions
Error	$(-50, 100)$	
Delta error	$(-100, 100)$	
Control signal	$(0, 20)$	

Y en la Tabla 14, se encuentran los rangos de operación del universo con sus respectivas funciones de membresía de la función $G_{22}(s)$.

Tabla 14 Datos del controlador $G_{22}(S)$ difuso.

Universo	Rango de operación	Conjuntos difusos con sus funciones de membresía
Error	$(-50, 100)$	
Delta error	$(-100, 100)$	
Señal de control	$(-4.5, 0)$	

- Definición de las reglas difusas

Las reglas difusas se establecen de acuerdo a la evaluación de los universos de entrada con respecto al universo de salida, a partir de un modelo FAM se establecen



las reglas para ambos controladores difusos⁷⁵. Esta información se ve reflejada en la Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 15. Evaluación de universo de salida, respecto a los universos de entrada.

Error	Delta Error	Señal de control
Positivo grande	Positivo grande	Muy alta
Positivo grande	Positivo pequeño	Muy alta
Positivo grande	Cero	Muy alta
Positivo grande	Negativo pequeño	Muy alta
Positivo grande	Negativo Grande	Muy alta
Positivo pequeño	Positivo grande	Alta
Positivo pequeño	Positivo pequeño	Alta
Positivo pequeño	Cero	Alta
Positivo pequeño	Negativo pequeño	Alta
Positivo pequeño	Negativo Grande	Alta
Cero	Positivo grande	Medio
Cero	Positivo pequeño	Medio
Cero	Cero	Medio
Cero	Negativo pequeño	Medio
Cero	Negativo Grande	Medio
Negativo pequeño	Positivo grande	Bajo
Negativo pequeño	Positivo pequeño	Bajo
Negativo pequeño	Cero	Bajo
Negativo pequeño	Negativo pequeño	Bajo

⁷⁵ Cruz, P. P. (2010). Inteligencia co aplicaciones a la ingeniería.

Negativo pequeño	Negativo Grande	Bajo
Negativo grande	Positivo grande	Muy bajo
Negativo grande	Positivo pequeño	Muy bajo
Negativo grande	Cero	Muy bajo
Negativo grande	Negativo pequeño	Muy bajo
Negativo grande	Negativo Grande	Muy bajo

Como la señal de control del controlador de agua de fondo es negativa, el orden de la FAM de esta variable de salida se invierte para realizar un correcto control del proceso., es decir, el controlador manda el valor “Muy bajo” cuando el error es positivo grande y “Muy alto” cuando el error negativo grande.

Tabla 16. Evaluación de universo de salida, respecto a los universos de entrada.

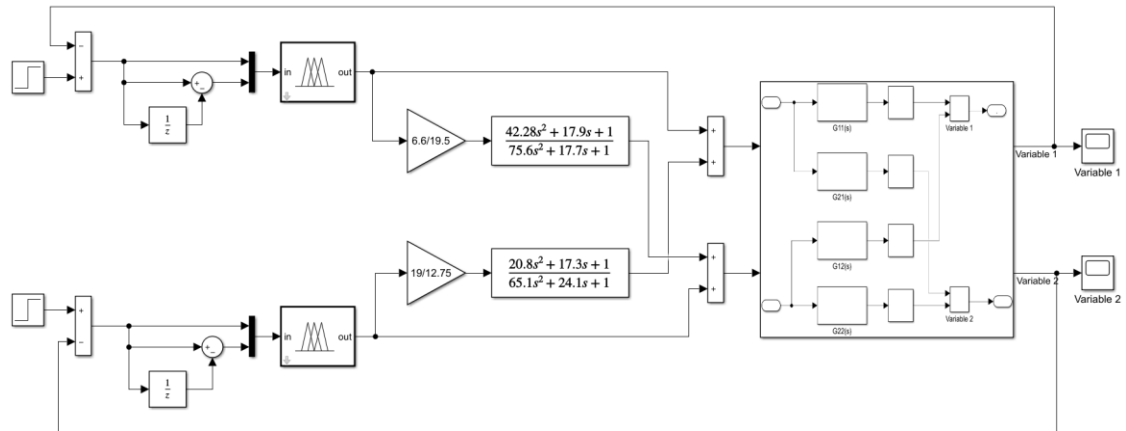
Error	Delta Error	Señal de control
Positivo grande	Positivo grande	Muy bajo
Positivo grande	Positivo pequeño	Muy bajo
Positivo grande	Cero	Muy bajo
Positivo grande	Negativo pequeño	Muy bajo
Positivo grande	Negativo Grande	Muy bajo
Positivo pequeño	Positivo grande	Bajo
Positivo pequeño	Positivo pequeño	Bajo
Positivo pequeño	Cero	Bajo
Positivo pequeño	Negativo pequeño	Bajo
Positivo pequeño	Negativo Grande	Bajo
Cero	Positivo grande	Medio
Cero	Positivo pequeño	Medio

Cero	Cero	Medio
Cero	Negativo pequeño	Medio
Cero	Negativo Grande	Medio
Negativo pequeño	Positivo grande	alta
Negativo pequeño	Positivo pequeño	alta
Negativo pequeño	Cero	alta
Negativo pequeño	Negativo pequeño	alta
Negativo pequeño	Negativo Grande	alta
Negativo grande	Positivo grande	Muy alta
Negativo grande	Positivo pequeño	Muy alta
Negativo grande	Cero	Muy alta
Negativo grande	Negativo pequeño	Muy alta
Negativo grande	Negativo Grande	Muy alta

5.8 PASO 7: LAZO DE CONTROL MULTIVARIABLE CON CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS

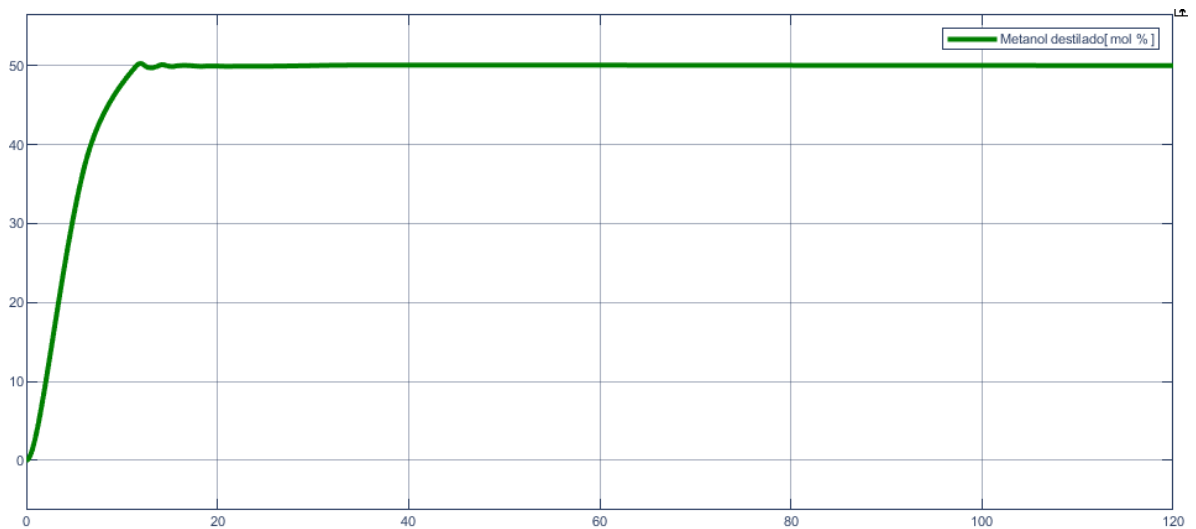
Partiendo del lazo de control clásico PID para el sistema MIMO, se reemplaza el controlador PI de $G_{11}(s)$ y el controlador PID de $G_{22}(s)$ por los controladores lógicos difusos creados en el paso 6. Como se aprecia en la Figura 82.

Figura 82. Diagrama de bloques de bloques del lazo de control multivariable con controladores lógicos difusos.



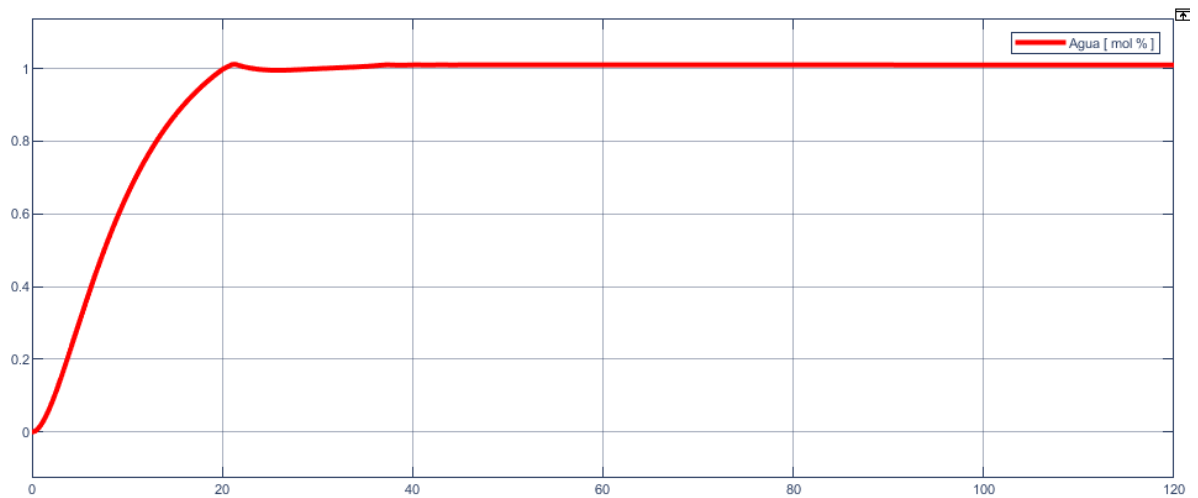
En la figura 83 se observa la respuesta de la variable 1 ante un único Setpoint de 50.

Figura 83. Respuesta de la variable 1 en lazo cerrado con controlador Fuzzy ante un Setpoint de 50.



En la figura 84 se observa la respuesta de la variable 2 ante un único Setpoint de 1.

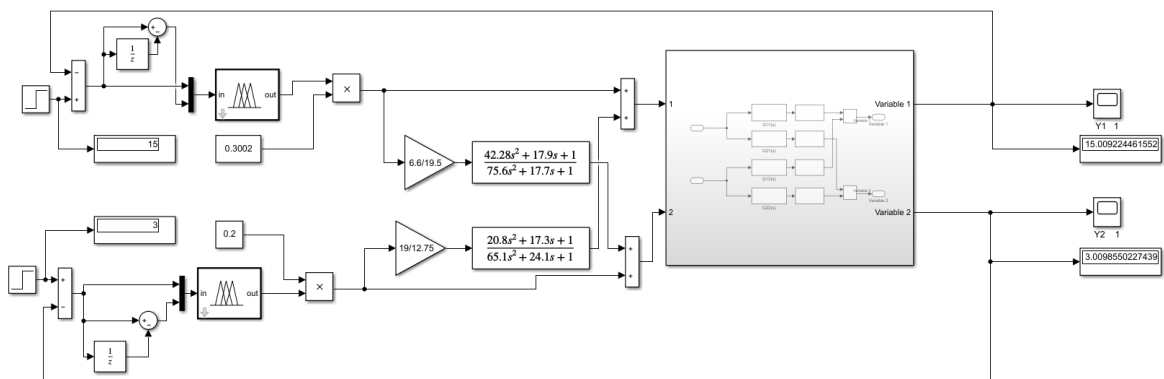
Figura 84. Respuesta de la variable 2 en lazo cerrado con controlador Fuzzy ante un Setpoint de 1.



5.9 PASO 8: LAZO DE CONTROL MULTIVARIABLE CON CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS CON RANGO AMPLIO

Para poner a funcionar un controlador difuso en rango amplio, es decir en diferentes setpoint al de diseño, se debe encontrar una serie de ganancias que al multiplicarse con la salida se logre estabilizar en el setpoint indicado. En la figura 85 al lado del controlador difuso se encuentra un bloque de product y en una de las entradas esta la contante que se usa para encontrar las ganancias.

Figura 85. Diagrama de bloques para encontrar las ganancias





En la tabla 17 y 18 se encuentran las ganancias a ingresar a la herramienta cftool para la obtención del polinomio.

Tabla 17. Ganancias que requiere el controlador del proceso 1 a determinado setpoint

SetPoint	Ganancia
50	1
45	0.90000755
40	0.8002
35	0.7002
30	0.6002
25	0.5002
20	0.4002
15	0.3002

Tabla 18 .Ganancias que requiere el controlador del proceso 1 a determinado setpoint

SetPoint	Ganancia
15	1
12	0.8
9	0.6
6	0.4
3	0.2

Para encontrar el polinomio se ingresa los setpoints y las ganancias encontradas como vectores, se selecciona los datos del eje X, eje Y, el grado del polinomio en la herramienta. Una vez se ingrese los datos en una sección con el nombre de resultados se verán los coeficientes (figura 86 y 87).



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co

Figura 86. Interfaz de la herramienta cftool para la obtención del polinomio del controlador difuso que controla el destilado de metanol.

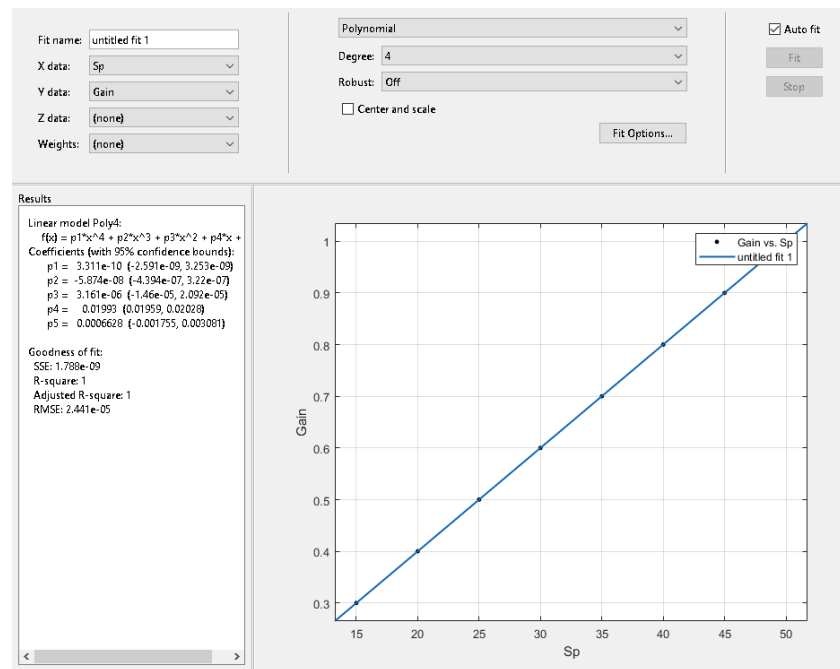
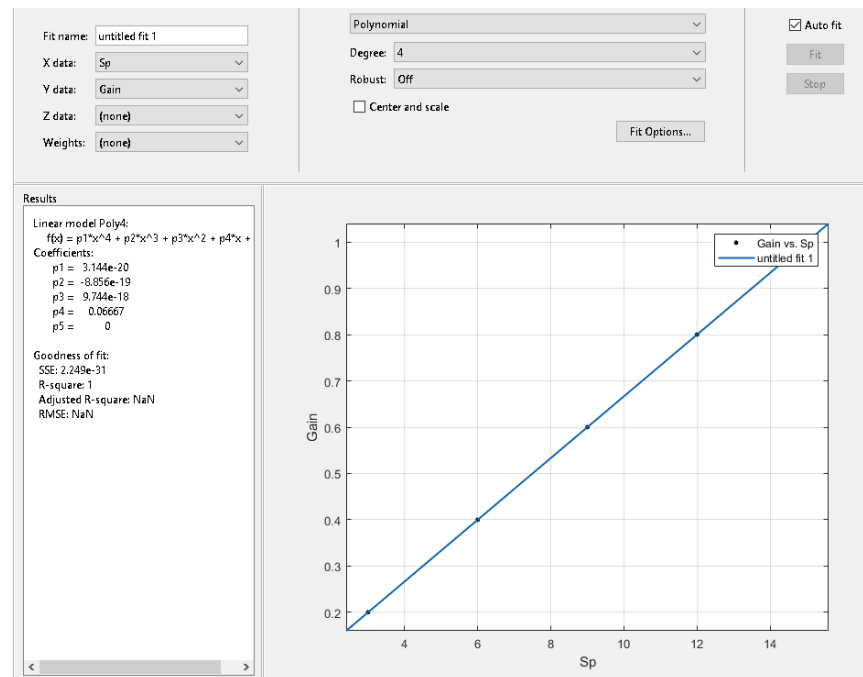
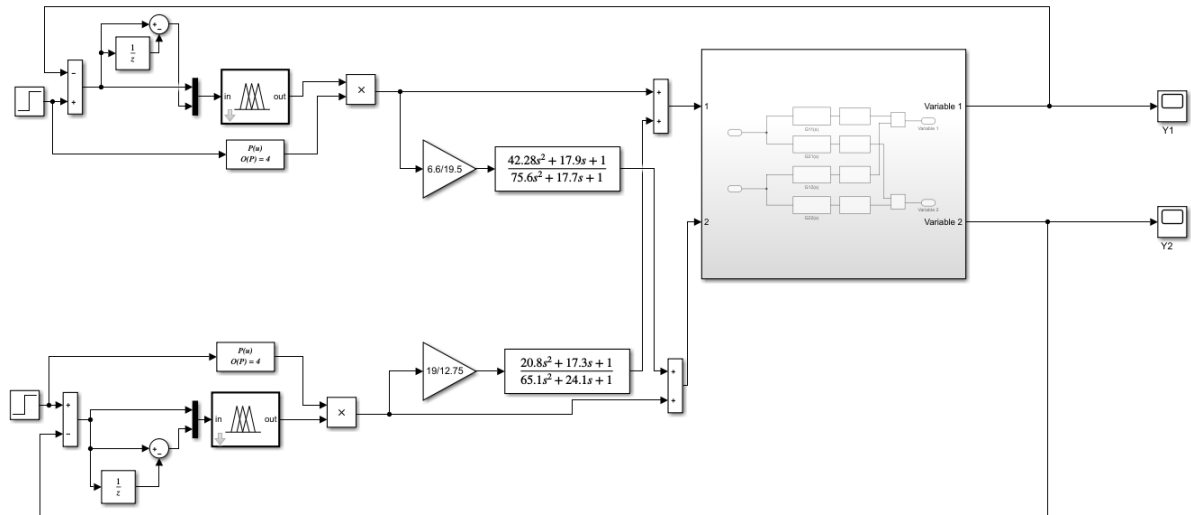


Figura 87. Interfaz de la herramienta cftool para la obtención del polinomio del controlador difuso que controla el porcentaje del agua.



En la figura 88 está el diagrama de bloques con la implementación del polinomio para que el controlador de la columna controle en cualquier setpoint.

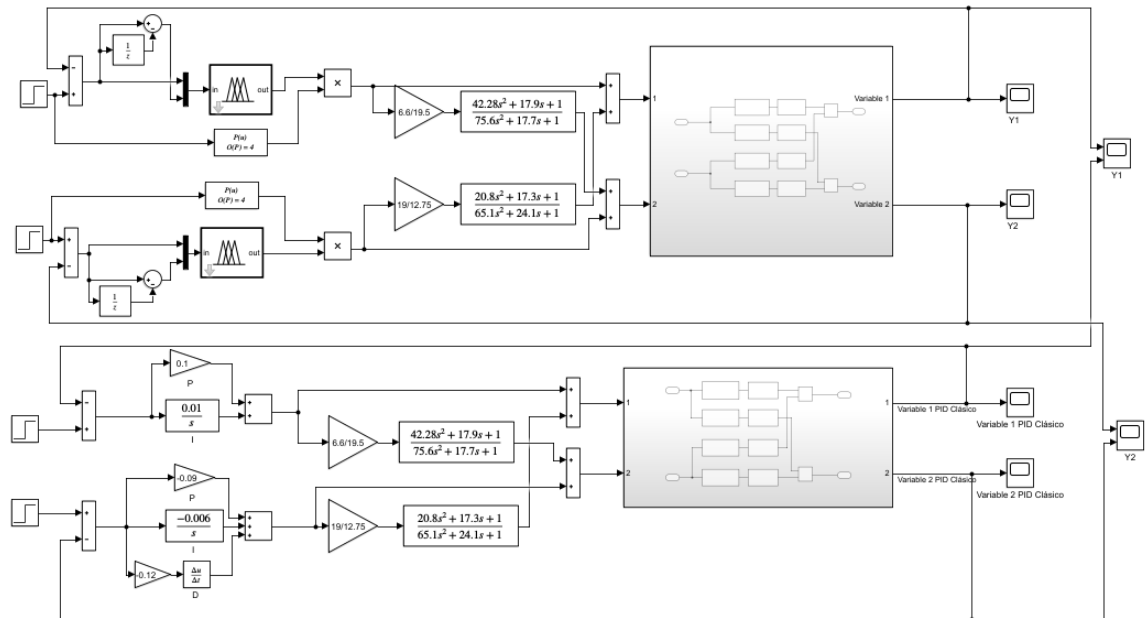
Figura 88. Diagrama de bloques de la columna con la implementación de los controladores difusos funcionando en rango amplio.



5.10 COMPARATIVA ENTRE CONTROLADOR DIFUSO CONTRA CONTROLADOR CLÁSICO PID PARA SISTEMAS MIMO.

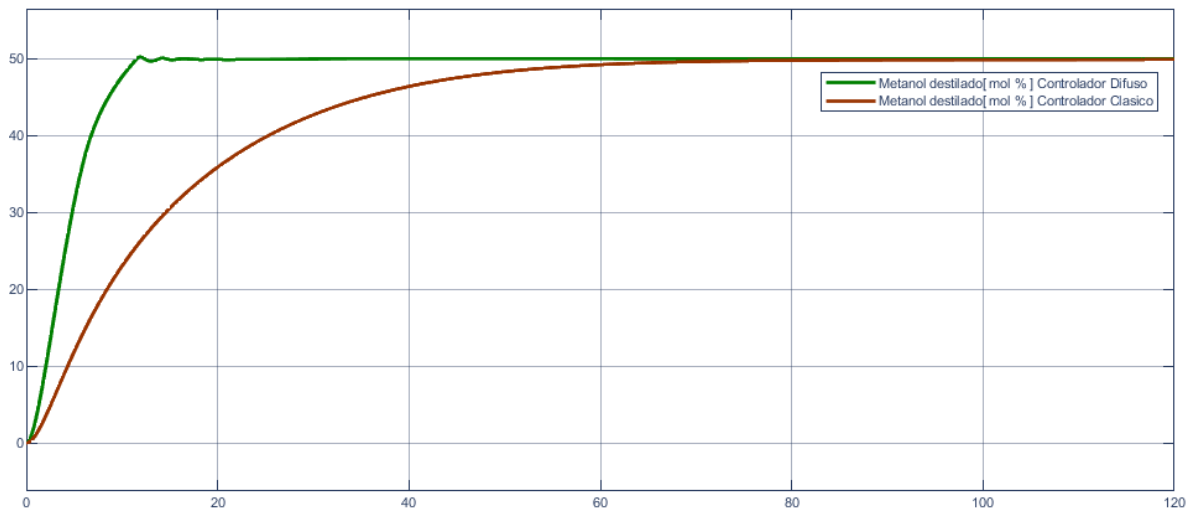
En la figura 89 se encuentran los dos controladores para su respectiva confrontación el superior se trata del controlador difuso y el inferior del controlador clásico PID para sistemas MIMO.

Figura 89. Confrontación entre controlador Fuzzy y PID clásico para sistema MIMO.



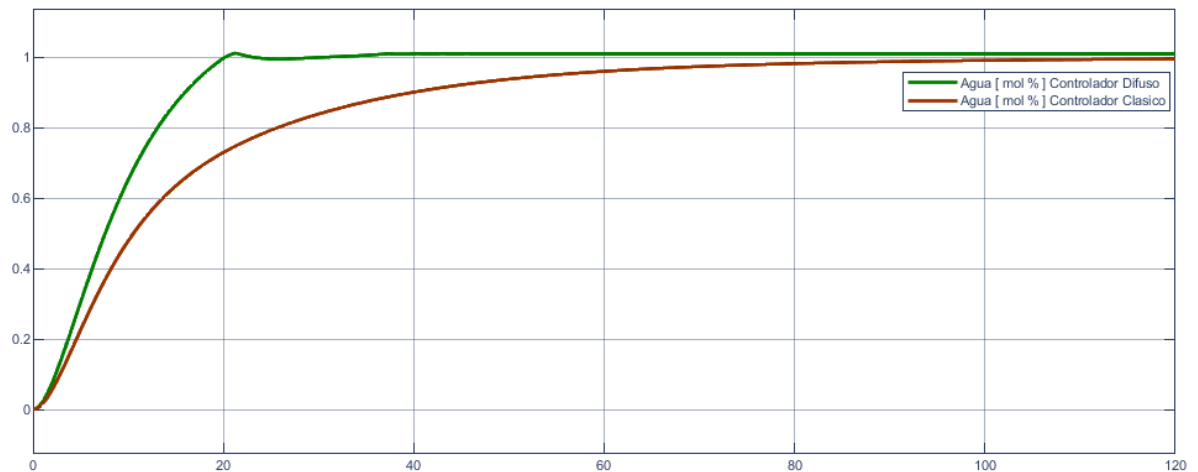
La confrontación de los comportamientos entre la salida del controlador Fuzzy y el PID clásico para la variable 1, se muestran en la figura 90.

Figura 90. Confrontación entre salida del controlador Fuzzy y el PID clásico para la variable 1.



Y la confrontación de los comportamientos entre la salida del controlador Fuzzy y el PID clásico para la variable 2, se muestran en la figura 91.

Figura 91. Confrontación entre salida del controlador Fuzzy y el PID clásico para la variable 2.



Los controladores difusos diseñados mostraron una reducción en comparación a los controladores clásicos del 34.2 - 36.7 en el tiempo de crecimiento, 45.6 - 58.1 en el tiempo de estabilización y aumento el sobreimpulso en 0.5 - 1.1 por ciento.

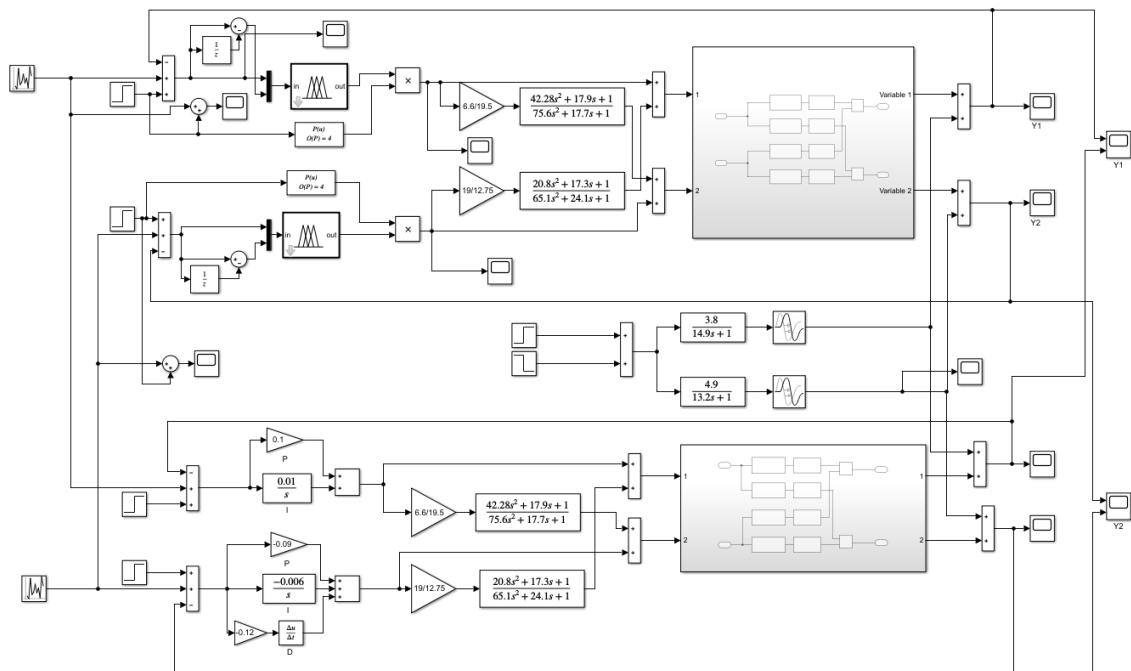
6. CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DE LA ESTRATEGIA DESARROLLADA EN BASE A UNA COMPARATIVA CON LA TÍPICA ESTRATEGIA DE CONTROL CLÁSICO PID PARA SISTEMAS MIMO

En el presente capítulo la validación tiene correspondencia con el último paso de la estrategia desarrollada donde en dicho paso se realiza la comprobación de la robustez de la malla de control ante ruido y perturbaciones de los controladores clásicos y difusos. Donde adicionalmente para validar la estrategia desarrollada también se evaluó el rendimiento o desempeño bajo diferentes índices, y se enfrentaron a los índices de desempeño o rendimiento obtenidos de la estrategia clásica.

6.1. ANÁLISIS DE ROBUSTEZ DE LOS CONTROLADORES

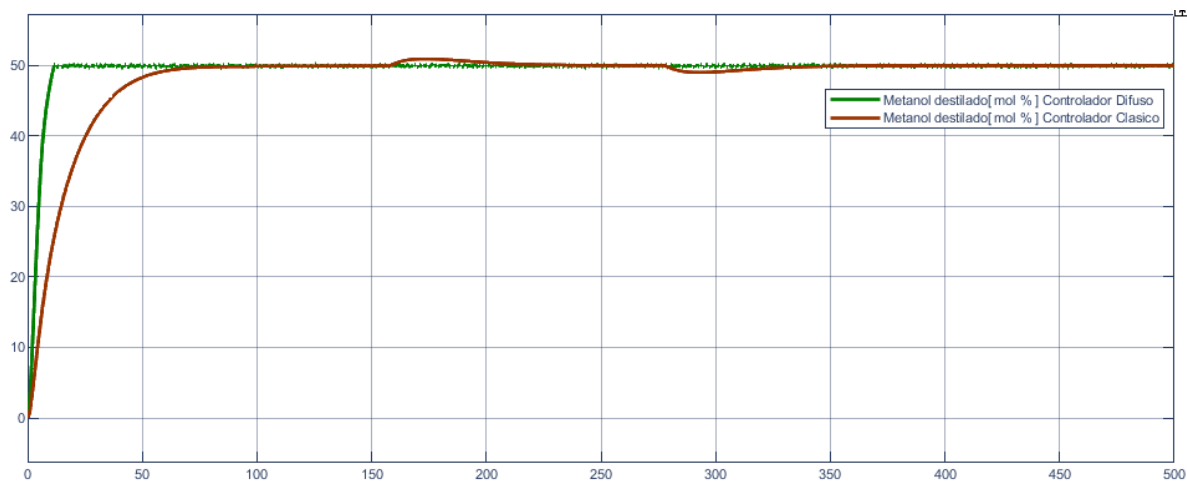
Con el fin de evaluar la robustez del lazo de control multivariable ante aspectos como variación del setpoint, ruido y posibles perturbaciones, se realiza el diagrama de bloques en la figura 92. El ruido y la perturbación en cada uno de los lazos tienen un valor del 10% del setpoint.

Figura 92. Lazo de control multivariable con controladores clásicos sometido ruido y perturbaciones.



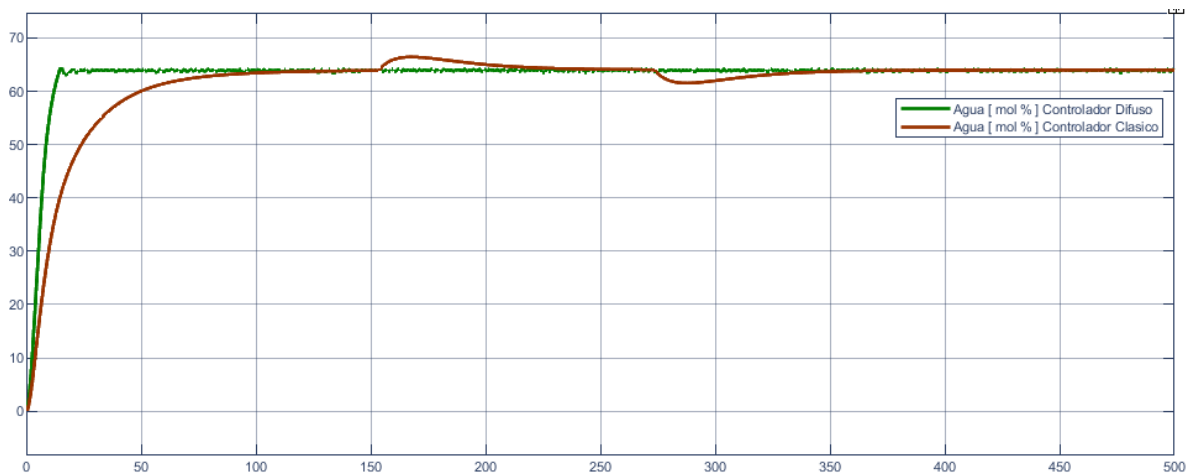
En la figura 93, se observa la confrontación del controlador difuso contra el controlador clásico PI para la variable 1.

Figura 93. Confrontación del controlador difuso contra el PI clásico en la variable 1 frente a ruido y perturbación.



Y en la figura 94, se observa la confrontación del controlador difuso contra el controlador clásico PID para la variable 2.

Figura 94. Confrontación del controlador difuso contra el PI clásico en la variable 1 frente a ruido y perturbación.



Como se observa en la figura 93 y 94 los controladores difusos logran atenuar la perturbación, en el minuto 150 cuando se aplica la perturbación el controlador reacciona a esta reduciendo la acción de control manteniéndola en un rango de error que no se alcanza a percibir por el ruido que el controlador no puede eliminar. El controlador clásico a comparación de controlador difuso es todo lo opuesto referente a la perturbación en donde se ve afectado su setpoint un 3.85 – 6.13 por ciento, el ruido no lo afecta.

Se vario el setpoint un 20% por arriba (Figura 95 y 96) y por debajo (Figura 97 y 98) del anterior setpoint (figura 93 y 94), donde se busca que el controlador funcione correctamente en cualquier setpoint que le indiquemos además del que fue diseñado.

Figura 95. Variando el setpoint 20 % arriba del setpoint comparado variable 1

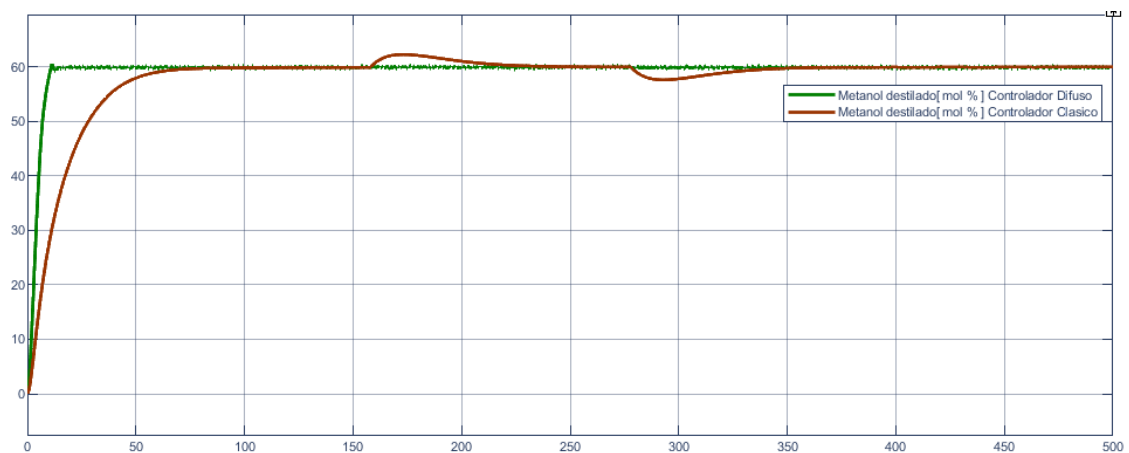


Figura 96 .Variando el setpoint 20 % arriba del setpoint comparado variable 2

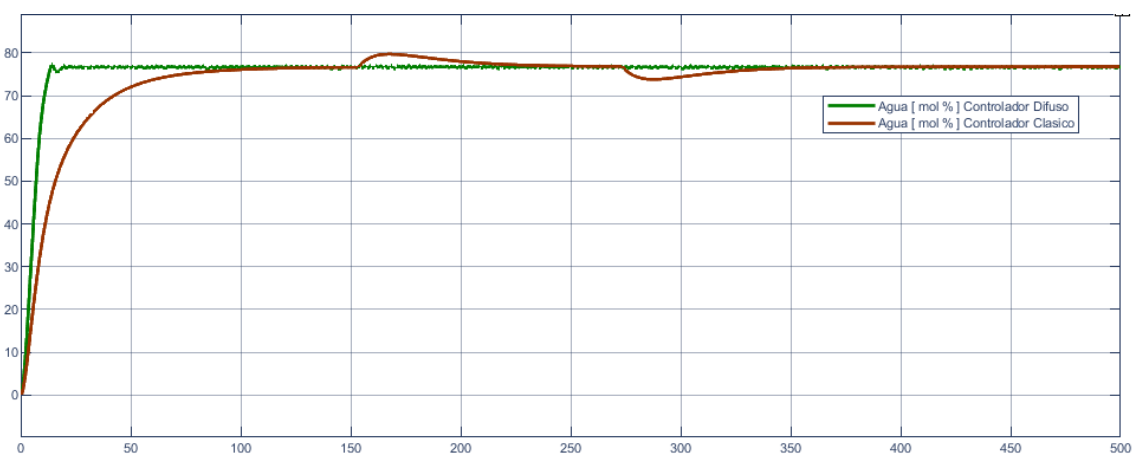


Figura 97. Variando el setpoint 20 % por debajo del setpoint comparado variable 1

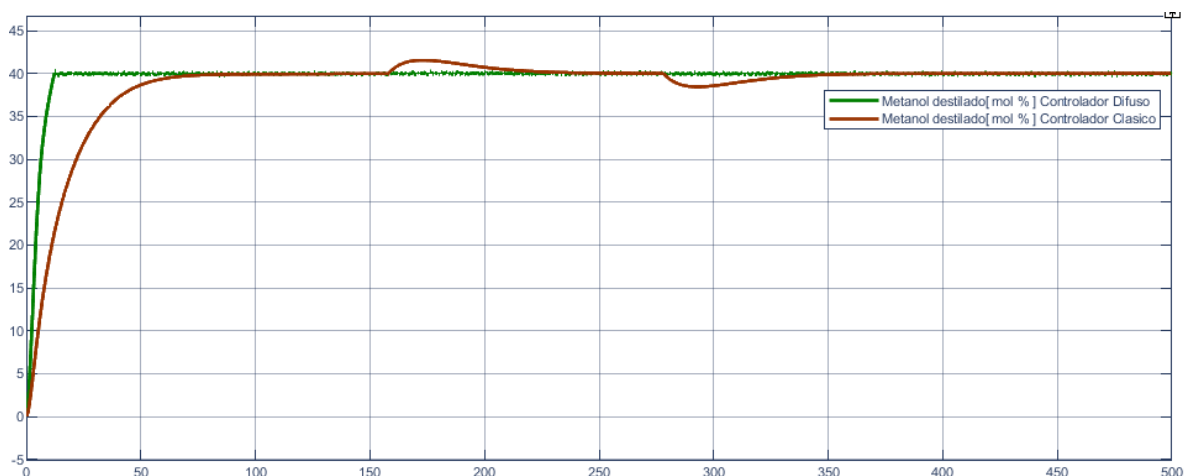
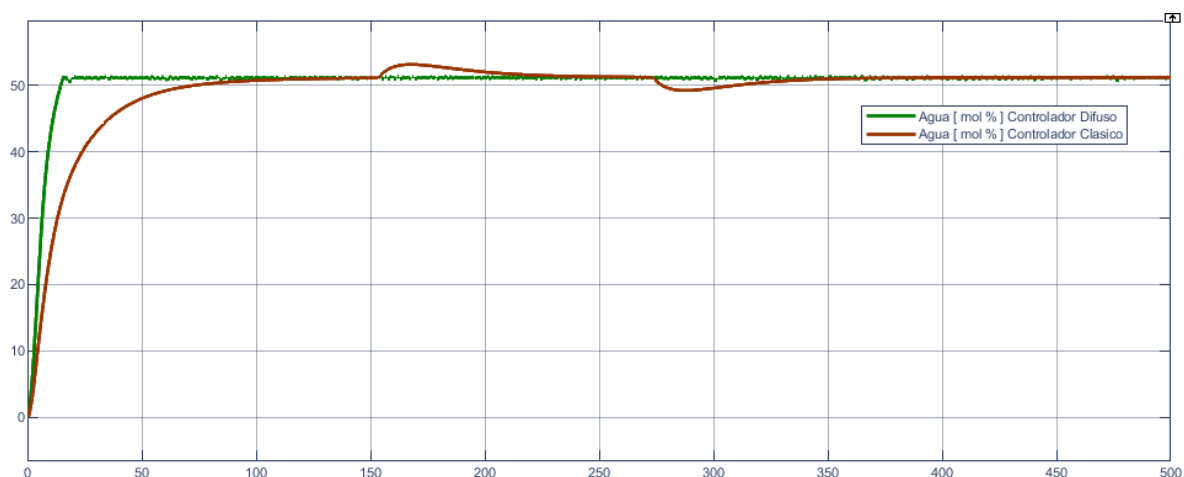


Figura 98. Variando el setpoint 20 % por debajo del setpoint comparado variable 2



En las figuras del 95 al 98 se pudo observar que los controladores diseñados controlan en cualquier setpoint que se le ingrese a la columna en los dos sistemas SISO.



6.2 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE LOS CONTROLADORES

Para el análisis de rendimiento se utilizaron los métodos ISE, IAE, ISU Y TVU. Según (Rodríguez, M. 2015)⁷⁶ los índices y entidades básicas de desempeño han sido usados extensamente en la sintonización de controladores. Por ejemplo, la integral del cuadrado del error (integral squared error, ISE por sus siglas en ingles). Es conocido que los índices de desempeño basados en la integral del cuadrado del error son antagonistas de los índices de desempeño basados en la integral del cuadrado del control. Un control óptimo robusto es el resultado de una optimización multi-objetivos que balancea los índices antagonistas. Al minimizar los índices de modera la acción de control y evita que el estado del proceso salga de los límites de validez del modelo. Adicionalmente el error acumulativo que penaliza la acción de seguimiento, viene dado por la integral del valor absoluto del error (integral absolute error (Ie) se minimiza el error del control (desempeño), pero al minimizar los índices de control (Iu) aumenta la tolerancia del desempeño ante errores de modelación pues, IAE por sus siglas en ingles). Una medida que determina la energía empleada por el controlador (esfuerzo de control), viene representada por la integral del cuadrado de las desviaciones de la señal de control en el estado estacionario (integral square signal control deviation, ISU por sus siglas en ingles). La evolución a la salida del controlador vendrá expresada por el valor absoluto de las variaciones totales TVU (equivalente al IADU). Y finalmente, otro indicador en un sistema de control es el tiempo de asentamiento a un correspondiente ancho de banda (Ts).

- ISE (integral del error cuadrático, error del control).

$$J_{e1} = \sum_{k=0}^N e(k)^2 \quad (115)$$

- IAE (integral del valor absoluto del error, penaliza la acción de seguimiento).

$$J_{e3} = \sum_{k=0}^N |r_k - y_k| \quad (116)$$

⁷⁶ A. Rodríguez Mariano et al., "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*, 14.3 (2015), 167–204.

- ISU (Integral de la salida de control cuadrática, energía o esfuerzo de control).

$$J_{u1} = \sum_{k=0}^N (u(k) - u_{ss})^2 \quad (117)$$

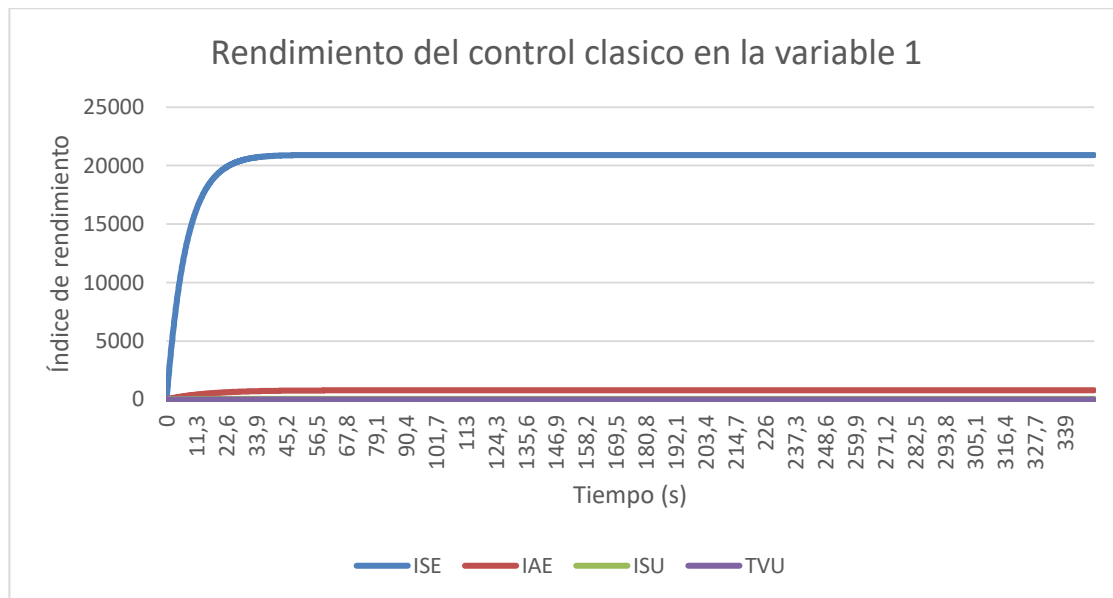
- TVU (Integral de la variación total de control, evolución a la salida del control).

$$J_{u2} = \sum_{k=0}^N |u_k - u_{k-1}| \quad (118)$$

Para el presente análisis de rendimiento el mejor control es definido por aquel con un menor tiempo de asentamiento, menor error acumulativo, menor esfuerzo de control y una energía mínima de seguimiento.

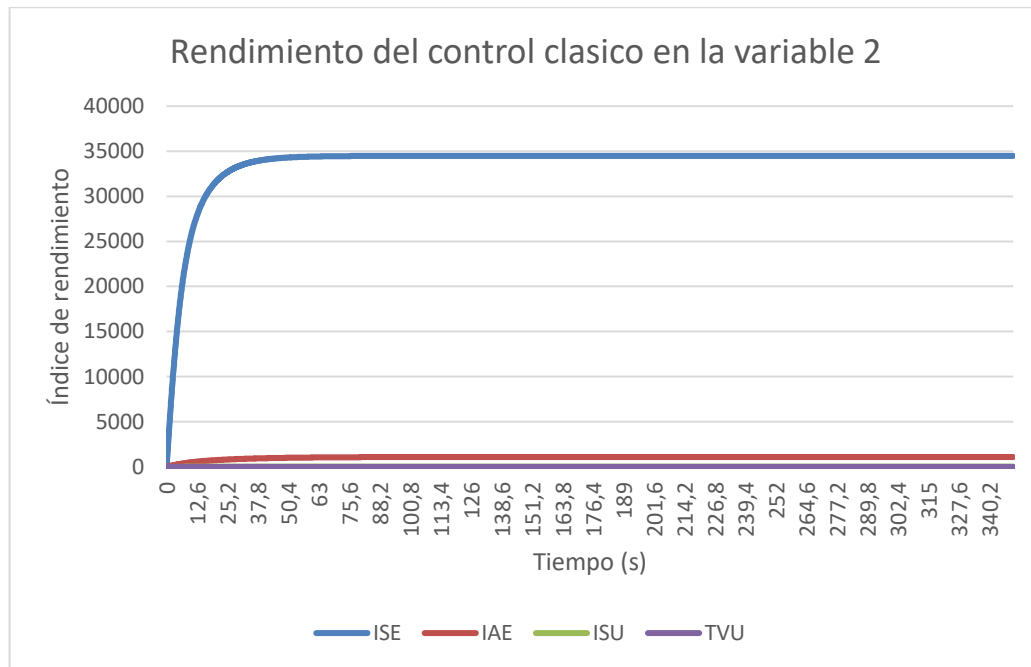
En la figura 99 se observan los resultados de la evaluación de los índices de rendimiento del control multivariable clásico para la variable 1.

Figura 99. Rendimiento del control multivariable clásico en la variable 1.



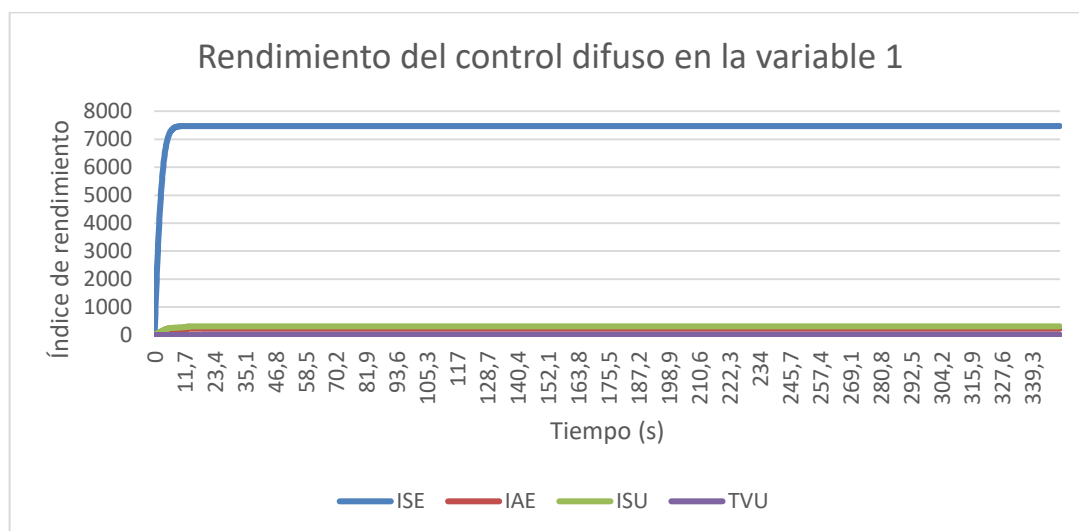
En la figura 100, se observan los resultados de la evaluación de los índices de rendimiento del control multivariable clásico para la variable 2.

Figura 100. Rendimiento del control multivariable clásico en la variable 2.



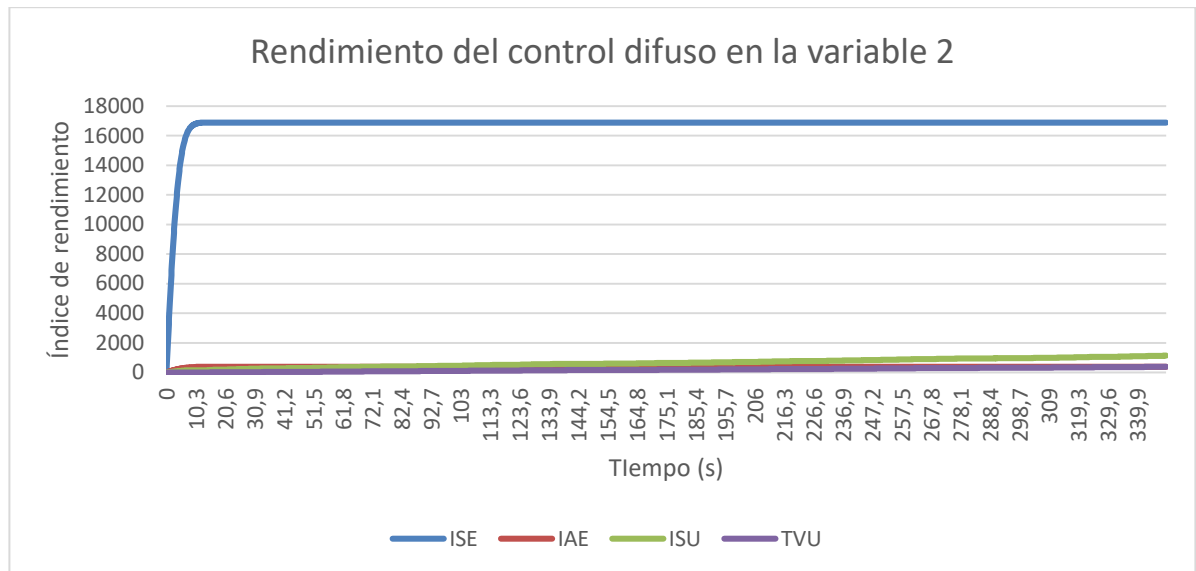
En la figura 101, se observan los resultados de la evaluación de los índices de rendimiento del control multivariable difuso desarrollado para la variable 1.

Figura 101. Rendimiento del control multivariable difuso en la variable 1.



En la figura 102, se observan los resultados de la evaluación de los índices de rendimiento del control multivariable difuso desarrollado para la variable 2.

Figura 102. Rendimiento del control multivariable difuso en la variable 2.



Se realiza el análisis que determina el rendimiento de cada uno de los lazos cerrados en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados de la evaluación de rendimiento.

	Índice de rendimiento	MIMO CLÁSICO	MIMO DIFUSO	Porcentaje de cambio Difuso Vs PID	Efecto del cambio
	ISE	20.914e3	7.468e3	64.29%	Positivo
	IAE	791.23	230.42	70.87%	Positivo
	ISU	51.81	314	506.06%	Negativo
	TVU	0.9373	8.0915	763.27%	Negativo
	ISE	34.483e3	16.889e3	51.02%	Positivo
	IAE	1.103e3	391.563	64.5%	Positivo
	ISU	23.803	1.131e3	4.6e3%	Negativo
	TVU	0.7614	381.27	5e3%	Negativo

Denotando de la tabla anterior que a enfrentar la estrategia de control de multivariable con la estrategia de control multivariable difusa desarrollada se obtiene efectos positivos en los índices de error y al minimizar los dichos índices (Ie) se



minimiza el error del control y se mejora por ende el desempeño. En cuanto a los cambios negativos en los índices de control (I_u) estos hacen elocuencia a un mayor gasto energético en los actuadores que manipulan las variables y a su vez un aumento de dichos índices da correspondencia a una menor tolerancia del control, lo que lo hace menos robusto.

El cambio negativo en los índices de control se debe al diseño de los controladores difusos en el que se priorizo el contrarrestar la perturbación haciendo un control de acción rápida que mantiene la salida de la columna en el setpoint con un pequeño porcentaje de error.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



7. CONCLUSIONES

- Las constantes negativas del proceso de la variable 2 del caso de estudio se debe a la naturaleza de la dinámica, el modelo obtenido en la identificación es un modelo que relaciona la entrada y la salida por lo que no se conoce a detalle lo que ocurre internamente. Al obtener la ganancia del sistema negativa las variables de control también serán negativas porque dependen de esta constante.
- El comportamiento del sistema al tener estas señales de control negativas en el proceso de la variable 2 permitirá realizar un correcto funcionamiento del controlador porque estarían equilibrando el lazo cerrado al no permitir que este valor incremente o decremente infinitamente (este caso ocurriría si los signos de la ganancia K y los de la señal de control fueran diferentes causarían que la planta sea imposible de controlar debido a su inestabilidad).
- En la confrontación del controlador difuso contra el clásico PID, se puede apreciar la robustez de estos tipos de controladores ya que determinan por medio de las funciones de membresía rangos que permitan establecer diferentes tipos de salida, Es decir, puede llegar a ser bastante específico con la señal de control que se desea a la salida. Y esto permite una señal de control mucho más precisa acorde a las entradas del controlador difuso.
- Los controladores difusos permiten especificar cada una de las condiciones dependiendo de las entradas, permitiendo abrir brechas a nuevas investigaciones que aborden dicha temática.
- Una vez llevado a cabo el análisis de las características que tienen los sistemas MIMO, controlados con estrategia PI o PID y al compararlo con los requerimientos de los lazos de control difuso. Se puede concluir, que una vez perfilada una proyección a nivel de diseño es pertinente mantener la malla de desacople, ya que es la etapa que garantiza poder independizar cada uno de los sistemas y hacer que cada entrada se relacione con una salida llevando a que cada variable se comporte como un sistema SISO.
- Una vez cada variable esté relacionada de manera independiente con una entrada el perfilamiento del sistema difuso puede trabajarse de una manera más convencional tanto así que se pueden usar las mismas componentes de la estrategia clásica (error, sumatoria de error y delta error) para perfilar el sistema difuso.



- La potencialidad y funcionalidad del controlador multivariable al ser un método basado en el modelo matemático del sistema a controlar, depende del nivel de precisión que se tenga al realizar el paso de identificación de las funciones de transferencia. En conclusión, la malla de control será tan buena como tan bueno sea el modelado del sistema.
- Se aprecia en la segunda proyección de cada una de las variables, como la malla de desacople permite separar la dinámica que interfiere en el otro sistema. Obteniendo así un valor de interferencia en micras. Esto permite concluir y validar la robustez que este tipo de modelado garantiza para los sistemas multivariables.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



8. RECOMENDACIONES

Este caso de estudio, permite encaminar futuros trabajos que se adentren más a las características y ventajas que se adquiere al utilizar controladores difusos. Por lo tanto, se recomienda evaluar y establecer más metodologías que permitan facilitar el uso y los casos de estudio presentes en estos tipos de controladores.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



9. BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-Adheem, W. R., & Ibraheem Kasim, I. (2019). *“Decoupled control scheme for output tracking of a general industrial nonlinear MIMO system using improved active disturbance rejection scheme”*, *Alexandria Engineering Journal*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.09.016>
- Alarcón, M. A. (2009). *Diseño de un sistema de control multivariable para un circuito de molienda en húmedo*. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2550/71265598_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alishiri, S. T. (2019). *A novel adaptive three stages model predictive control based on fuzzy systems: Application in MIMO controlling of MED-TVC process*, *Journal of the Franklin Institute*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.07.037>
- Barrera, J. F., & Barrios Urueña, E. (2017). *Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor*. Obtenido de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5428/4972
- Benavidez, J. F., & Vacca González, H. (s.f.). *Los conjuntos borrosos, modelación cualitativa de la realidad en ingeniería*. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/800/5429>
- Bonilla, J. E., Grisales, V. H., & Melgarejo, M. (2006). *Diseño e implementación de un controlador difuso basado en FPGA*. Obtenido de <http://161.111.232.132/VII/cdnave/pdf/79.pdf>
- Cao, X., & Beshah, A. (2019). *Robust multivariable predictive control for laser-aided powder deposition processes*, *Journal of the Franklin Institute*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.12.015>
- Carlucho, I., Mariano, D., & Acosta, G. (2020). *An adaptive deep reinforcement learning approach for MIMO PID control of mobile robots*, *ISA Transactions*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.02.017>
- Cruz, P. P. (2010). *Inteligencia co aplicaciones a la ingeniería*. Obtenido de <https://lelinopontes.files.wordpress.com/2014/09/inteligencia-artificial-con-aplicaciones-a-la-ingenieria3ada.pdf>
- D'Negri, C. E., & De Vito, E. L. (2006). *Introducción al razonamiento: lógica difusa*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382138367007>



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- Enciso, G. A. (2013). *El proceso de investigación*. Obtenido de https://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Lectura/bachillerato/documentos/LE C7.2.pdf
- Fariñas, L. Á. (2006). *Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariables*. Obtenido de [http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/5931/Luis Montero](http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/5931/Luis_Montero)
- Francisco, R. (2015). *Tipo, niveles y diseños de investigación*. Obtenido de <https://ahigucitin.jimdo.com/app/download/16724000896/Tipos>
- Galluppi, O., Formentin, S., Novara, C., & Savaresi, S. M. (2017). *Nonlinear stability control of autonomous vehicles: a MIMO D2-IBC solution*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317309345?via%3Dihub>
- García, R. E., Felix Benjamin, G., & Bello Pérez, R. (2014). *Evaluación de impacto del entrenamiento con lógica difusa*. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-33052014000100005&lng=en&nrm=iso
- Garrán, P. A. (2009). *Desacoples aproximado y por descomposición en valores singulares de sistemas de control MIMO*. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000400005
- Ghosh, S., & Somnath, P. (2020). *Centralized PI controller design method for MIMO processes based on frequency response approximation*, *ISA Transactions*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.041>
- Goud, E. C., Rao A, S., & Chidambaram, M. (2020). *Improved decentralized PID controller design for MIMO processes*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320300446?via%3Dihub>
- Guerra, I. (2012). *Control predictivo multivariable con linealización sucesiva y targets de entrada*. Obtenido de https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/04_v19_24/revista_20/05112012/10.pdf
- Guzmán, D., & Castaño, V. M. (2006). *La lógica difusa en ingeniería: principios, aplicaciones y futuro*. Obtenido de <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/2640-Texto%20del%20art%C3%ADculo-4120-1-10-20121016.pdf>



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- Hergueta, D. (s.f.). *Proceso de fabricación y sistemas integrados*. Obtenido de file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/componente45805%20(1).pdf
- Jurado, J. G. (2012). *Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*. Obtenido de <http://espacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:IngInf-Jgarrido/Documento.pdf>
- Khandelwal, S., & Detroja, K. (2020). *The optimal detuning approach based centralized control design for MIMO processes*, *Journal of Process Control*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.10.006>
- Koppel, V., & Segal, M. (2004). *Análisis de Estrategias de Desacoplamiento en Sistemas Interactuantes de Control de Procesos*. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0718-07642004000600013&script=sci_arttext
- Lima, J. B. (2008). *Técnicas y métodos de investigación*. Obtenido de <http://www.esap.edu.co/portal/wp-content/uploads/2017/10/4-Proyecto-Futuro-ii.pdf>
- Mahmoud, M. M. (2018). *Damping of surge effects and enhancement of dynamic response of distillation plant using MIMO fuzzy control*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318329082?via%3Dihub>
- Margun, A. (s.f.).
- Margun, A., Furtat, I., & Kremlev, A. (2017). *Robust control of twin rotor MIMO system with quantized output*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317314465?via%3Dihub>
- Martí, L. M., & Botello Lemus, M. A. (2018). *Multivariable Control Strategy for a refrigeration plant*, *ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)*. Obtenido de <https://doi.org/10.5935/2447-0228>
- Matute, A., & Bernal Suárez, W. (2017). *Técnicas de Lógicas Difusa en Ingeniería de Control*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/345646783_Fuzzy_Logic_Techniques_in_Control_Engineering
- Mejía Giraldo, D., Bolaños, R. A., & Correa, C. A. (2007). *Técnicas de control adaptativas aplicadas a sistemas multivariables (M.I.M.O.)*. Obtenido de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5347/2955>



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Morcillo, C. G. (s.f.). *Técnicas Delaware computación blanda*. Obtenido de https://www.academia.edu/33196504/L%C3%B3gica_Difusa_T%C3%A9nicas_de_Softcomputing

Mousa Rezaee, R. J. (2020). *Robust adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear uncertain MIMO fluttering FGP plate based on feedback linearization*, *Aerospace Science and Technology*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.05.030>

Nivel de investigación. (s.f.). Obtenido de <https://proyectoseducativoscr.wordpress.com/elaboracion-del-ante-proyecto/capitulo-iii-marco-metodologico-de-la-investigacion/3-1-nivel-de-investigacion/>

Ortiz, H. A., & Garcia Jaimes, L. E. (2019). *Automatización del proceso de secado de producto húmedo, usando un método de control multivariable simplificado*. Obtenido de <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1367/1147>

Oviedo, J. J. (2003). *Control lineal de sistemas multivariables*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/259715594_Control_lineal_de_sistemas_multivariables

Pérez, J. L. (2000). *Número de condición y determinante de una matriz*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/18243054/numero-de-condicion-y-determinante-de-una-matriz-revista->

Prato, R. O., Coronel Méndez, M., & Rojas Sulbaran, R. (2017). *Efecto de las técnicas de desacoplamiento en sistemas multivariables*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612017000200471

Qi, R., Tao, G., Jiang, B., & Gong, H. (8 de sep de 2011). *Adaptive control of MIMO T-S fuzzy systems with general delay matrices*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016441443?via%3Dihub>

R, S. K., & Musalem, R. (s.f.). *Control mediante lógica difusa*. Obtenido de <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>

R. Hanuma Naik, D. V. (2020). *Independent controller design for MIMO processes based on extended simplified decoupler and equivalent transfer function*, *Ain Shams Engineering Journal*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.10.011>



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



- Rafael J. García et al. (2016). *“Design of fuzzy control strategy applied to food process deep freeze”*. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000100070&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Recio, T. (2005). *La descomposición en valores singulares (SVD) y algunas de sus aplicaciones*. Obtenido de <http://gaceta.rsme.es/abrir.php?id=496>
- Rodríguez, R. A., & Olachica Torres, Á. (2020). *Real time QFT controller for humidity and temperature in greenhouse*. Obtenido de http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/543/Art%C3%ADculo_CUING_v01.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Shah, D. H., & Patel, D. M. (2019). *Design of sliding mode control for quadruple-tank MIMO process with time delay compensation*, *Journal of Process Control*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.01.006>
- Thomas, M., & et , a. (2018). *Continuous higher order sliding mode control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems: An ISS approach*, *European Journal of Control*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2018.01.005>
- V., J. A., Ramón V., B., & Carrillo, E. (2011). *Design of a monitoring and control multivariable system through a SCADA system for separate plant anaerobic biodigestion*. Obtenido de https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_17/03122011/05.pdf
- Xue, D., & Tingxue , L. (2018). *An approach to design controllers for MIMO fractional-order plants based on parameter optimization algorithm*, *ISA Transactions*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.04.022>
- Yurkevich, V. D. (2015). *MIMO tracking PI/PID controller design for nonlinear systems based on singular perturbation technique*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315013622?via%3Dihub>
- Zarei, M. (2018)). *A multi-point kinetics-based MIMO-PI control of power in PWR reactors*, *Nuclear Engineering and Design*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.011>
- Zhang, W., & Hang , S. (2018). *Fuzzy adaptive control of nonlinear MIMO systems with unknown dead zone outputs*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.066>
- Orellana Prato, Rafael, coronel Méndez, María, & Rojas Sulbaran, Rubén. (2017). *Efecto de las técnicas de desacoplamiento en sistemas multivariables*.



SC-CER96940



“Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz”

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co



Ingeniería y Desarrollo, 35(2), 471-490. Retrieved April 21, 2022, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612017000200471&lng=en&tlng=es.

López-Rivera, M., Cortés-Villada, A.C., Giraldo, E. *Optimal Multivariable Control Design based on a Fuzzy Model for an Unmanned Aerial Vehicle* (2021) *IAENG International Journal of Computer Science*, 48 (2), pp. 1-6. Buscar de donde es

Yang, X., Zhao, C., Wang, J., Yu, J., Yang, M. Module coordination control of multi-modular lead-based reactor systems (2022) *Annals of Nuclear Energy*, 168, art. no. 108873, . Buscar de donde es

R. Wood, M. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column", *Chemical Engineering Science*, vol. 28, no. 9, pp. 1707-1717, 1973. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(73\)80025-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(73)80025-9)

Acharya, P., Dumpa, G., & Dan, T. K. (2016, April). Modelling and control of distillation column. In 2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC) (pp. 123-128). IEEE.

R. Kumar, S. Anand, A. Khulbey and A. Nath Jha, "Design of Fractional Order Controller for Wood-Berry distillation column," 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342220.



SC-CER96940



"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona
Pamplona - Norte de Santander - Colombia
Tels: (7) 5685303 - 5685304 - 5685305 - Fax: 5682750
www.unipamplona.edu.co