

# UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO*



---

**“Autosintonización difusa orientada al control de velocidad de un robot diferencial tipo oruga diseñado para un terreno agrícola de La Libertad”**

---

**Área de Investigación:**

Aplicaciones Robóticas.

**Autor(es):**

Br. García Honores, Marlon Gabriel.

Br. Moncada Calmet, Luis Felipe.

**Jurado Evaluador:**

**Presidente:** Ms. Alva Alarcón, Jorge Luis

**Secretario:** Ms. Vargas Díaz, Luis Alberto

**Vocal:** Ms. De la Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

**Asesor:**

Ms. Gonzales Cadenillas, Clayder Alejandro

**Código Orcid:** 0000-0002-6777-4479

**TRUJILLO-PERÚ  
2022**

**Fecha de sustentación:** 2022/09/07



# UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO*



---

**“Autosintonización difusa orientada al control de velocidad de un robot diferencial tipo oruga diseñado para un terreno agrícola de La Libertad”**

---

**Área de Investigación:**

Aplicaciones Robóticas.

**Autor(es):**

Br. García Honores, Marlon Gabriel.

Br. Moncada Calmet, Luis Felipe.

**Jurado Evaluador:**

**Presidente:** Ms. Alva Alarcón, Jorge Luis

**Secretario:** Ms. Vargas Díaz, Luis Alberto

**Vocal:** Ms. De la Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

**Asesor:**

Ms. Gonzales Cadenillas, Clayder Alejandro

**Código Orcid:**

**TRUJILLO-PERÚ  
2022**

**Fecha de sustentación:** 2022/09/07

**“Autosintonización difusa orientada al control de velocidad de un robot diferencial tipo oruga diseñado para un terreno agrícola de La Libertad”**

Elaborado por:

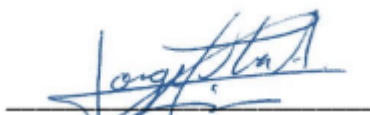


Br. García Honores, Marlon Gabriel.



Br. Moncada Calmet, Luis Felipe.

Aprobado por:



Presidente

Ms JORGE LUIS ALVA ALARCÓN

CIP 2114251



Secretario

Ms LUIS ALBERTO VARGAS DIAZ

CIP 2114251



Vocal

Ms OSCAR MIGUEL DE LA CRUZ RODRIGUEZ

CIP 2114251



Asesor

Ms CLAYDER ALEJANDRO GONZALES CADENILLAS

CIP 2114251

# DEDICATORIA

A Dios, por haber permitido el desarrollo de la tesis, dotándonos de los medios tangibles e intangibles para culminarla.

A nuestros padres, por habernos motivado y acompañado en el proceso, con sus consejos y buena predisposición para ayudar en cada objetivo.

A nuestros hermanos y seres queridos, por haber comprendido el tiempo que no les dimos mientras hacíamos este trabajo.

A nuestro asesor, el cual con gusto aceptó nuestra invitación y acompañó con su experiencia a lo largo de todo el proceso.

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, por habernos dado la fuerza y esperanza en medio de un contexto tan complicado y triste como es la pandemia. Por haber mantenido a salvo a nuestras familias y por habernos mantenido sanos para el desarrollo de la tesis.

A nuestros padres, por haber financiado los gastos que suponía el desarrollo del presente trabajo. Quedamos totalmente agradecidos por brindarnos la solvencia para poder obtener el material requerido.

A nuestro asesor MSc. Clayder Alejandro Gonzales Cadenillas, por su confianza y predisposición al prestarnos el robot Xplorer One sobre el cuál se desarrolla esta tesis y se implementan los algoritmos de control. Así mismo, le agradecemos por su comprometida enseñanza, ya que esta, nos motivó a querer investigar en el campo de la robótica y control.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación de controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa correspondientes a diferentes números de zonas de difusificación y desdifusificación en su sistema difuso, implementados en un robot móvil diferencial tipo oruga y desempeñado en un terreno agrícola a diferentes velocidades. Todo esto, con el objetivo de determinar las características en el dominio del tiempo para cada sistema de autosintonización a diferentes velocidades en terrenos agrícolas; los cuales, suelen ser de difícil acceso para robots no diseñados en condiciones de irregularidad en su trayectoria. El trabajo inició con el sustento del uso de los controladores autosintonizables basados en lógica difusa. Se mencionó que la mayoría de las plantas en el mundo real son no lineales y variantes en el tiempo, por lo tanto, para su accionamiento por medio del control clásico estas deben ser linealizadas, perdiendo de esa manera precisión en el control. Así mismo, se presentó el estado del arte donde se proporcionó toda la teoría en relación a la cinemática del robot diferencial, control discreto, lógica difusa y la autosintonización de ganancias de control. El trabajo continuó con la implementación de algoritmos con diferentes números de zonas de difusificación y desdifusificación para el controlador difuso autosintonizado y teniendo en cuenta la erradicación de desviaciones, se explicó el método y características de diseño para el controlador, siguiendo un protocolo que permitió comparar su desempeño de manera equitativa para cada número de zonas. Posteriormente, los controladores se sometieron a un suelo agrícola, donde se documentó el proceso y se extrajeron las características en el dominio del tiempo correspondiente a la variable de proceso de cada motor del robot; tales como, el tiempo de asentamiento, tiempo de subida, tiempo pico, tiempo de retardo, el porcentaje de sobrepaso máximo y el error estacionario, con el motivo de realizar el análisis de cada sistema difuso y su comparación. Finalmente, el trabajo concluyó con la presentación de los controladores más idóneos correspondientes a determinadas características en dominio del tiempo que representan estabilidad, exactitud y rapidez junto con desviación promedio.

## **ABSTRACT**

The present research work consisted in the evaluation of self-tuned speed controls by fuzzy logic corresponding to different numbers of diffusification and defuzzification zones in its fuzzy system, implemented in a caterpillar-type differential mobile robot and performed in an agricultural field at different speeds. All this, in order to determine the characteristics in the time domain for each self-tuning system at different speeds in agricultural land; which are usually difficult to access for robots not designed in conditions of irregularity in their trajectory. The work started with the support of the use of self-tuning controllers based on fuzzy logic. It was mentioned that most of the plants in the real world are non-linear and variant in time, therefore, for their activation by means of classical control, they must be linearized, thus losing precision in the control. Likewise, the state of the art was presented where all the theory was presented in relation to the differential robot kinematics, discrete control, fuzzy logic and control gain auto-tuning. The work continued with the implementation of algorithms with different numbers of diffusion and defuzzification zones for the self-tuned fuzzy controller and taking into account the eradication of deviations, the design method and characteristics for the controller were explained, following a protocol that helped to compare their performance equally for each number of zones. Subsequently, the controllers were subjected to an agricultural soil, where the process was documented and the characteristics in the time domain corresponding to the process variable of each robot motor were extracted; such as the settling time, rise time, peak time, delay time, the percentage of maximum overshoot and the stationary error, with the purpose of performing the analysis of each fuzzy system and its comparison. Finally, the work concluded with the presentation of the most suitable controllers corresponding to certain characteristics in the time domain that represent stability, accuracy, speed and average deviation.



# PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado calificador:

En cumplimiento a lo dispuesto en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada Antenor Orrego, para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico, nos es grato presentar a vuestra consideración el presente trabajo de tesis denominado:

“AUTOSINTONIZACIÓN DIFUSA ORIENTADA AL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN ROBOT DIFERENCIAL TIPO ORUGA DISEÑADO PARA UN TERRENO AGRÍCOLA DE LA LIBERTAD”

El presente trabajo, que involucró diseños, implementaciones, comparación y análisis se expone ante ustedes para que sea evaluado según vuestro criterio y consideración, para que emitan un dictamen respectivo, mientras esperamos que cumpla con las exigencias que amerita un trabajo de tesis.

Así mismo, sirva la presente para expresar nuestro completo agradecimiento a la plana docente de la universidad, por los conocimientos y experiencias inculcadas durante el completo desarrollo de nuestra formación académica.

Trujillo, 22 de septiembre de 2022

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT.....	viii
PRESENTACIÓN.....	ix
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xviii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxviii
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Problema de investigación .....	1
1.1.1. Realidad problemática. ....	1
1.1.2. Enunciado del problema .....	2
1.1.3. Formulación del problema .....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general .....	3
1.2.2. Objetivos específicos .....	3
1.3. Justificación .....	4
<b>II. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Antecedentes: .....	5
2.2. Marco teórico .....	7
2.2.1. Motor DC en sistemas de control:.....	7
a) Modulación por ancho de pulso (PWM).....	8
b) Codificador rotativo.....	9
2.2.2. Cinemática de robot diferencial .....	10
2.2.3. Trenes de rodaje y fricción. ....	11
a) Mecánica de los trenes.....	11

b)	Fricción .....	13
2.2.4.	Control PID .....	14
a)	Acción de control proporcional.....	14
b)	Acción de control integral .....	15
c)	Acción de control derivativo .....	16
c)	Sintonización de ganancias .....	17
2.2.5.	Control PI discreto .....	18
2.2.6.	Lógica difusa.....	19
a)	Definición .....	19
b)	Funciones de pertenencia .....	20
•	Función tipo trapezoidal:.....	20
•	Función tipo singleton:.....	21
•	Función tipo triangular: .....	21
•	Función de tipo S:.....	21
•	Función tipo campana: .....	22
c)	Variable lingüística.....	22
d)	Estructura básica de un controlador difuso.....	23
e)	Interfaz de difusificación .....	23
f)	Lógica de decisiones y base de reglas.....	23
g)	Base de conocimientos .....	24
h)	Interfaz de desdifusificación .....	24
i)	Principio de extensión .....	24
2.2.7.	Autosintonización por lógica difusa.....	25
a)	Autosintonización de un control PI.....	25
b)	Autosintonización difusa orientada al control de velocidad de un robot diferencial. ....	28
2.2.8.	Método del centroide .....	35

2.3.	Marco conceptual.....	37
2.3.1.	Sistema de control automático.....	37
a)	Planta .....	37
b)	Controlador.....	37
c)	Error.....	37
d)	Sensor .....	37
e)	Retroalimentación negativa .....	37
f)	Perturbación.....	37
2.3.2.	Bloque de muestreo y retención .....	38
2.3.3.	Características en el dominio del tiempo .....	38
a)	Tiempo de retardo .....	38
b)	Tiempo de subida .....	38
c)	Tiempo pico .....	38
d)	Porcentaje de sobrepaso máximo .....	38
e)	Tiempo de asentamiento .....	38
f)	Error estacionario.....	38
g)	Error estacionario promedio .....	38
2.3.4.	Tracción.....	39
2.3.5.	Velocidad de desviación promedio .....	39
2.3.6.	Principales números de zonas de difusificación-desdifusificación ....	39
2.4.1.	Hipótesis .....	39
2.4.2.	Variables. Operacionalización de variables. ....	39
a)	Variable independiente .....	39
b)	Variable dependiente .....	39
<b>III.</b>	<b>METODOLOGÍA EMPLEADA .....</b>	<b>41</b>
3.1.	Tipo y nivel de investigación .....	41
3.1.1.	Tipo de investigación:.....	41

b)	De acuerdo a la técnica de contrastación:.....	41
3.1.2.	Nivel de investigación: .....	41
3.2.	Población y muestra de estudio .....	41
3.2.1.	Población .....	41
3.2.2.	Muestra .....	41
3.3.	Diseño de investigación.....	41
3.3.1.	Diseño de sistemas difusos.....	41
a)	Tres zonas de difusificación-desdifusificación.....	42
b)	Cinco zonas de difusificación-desdifusificación.....	44
c)	Siete zonas de difusificación-desdifusificación.....	47
d)	Justificación de reglas .....	50
3.3.2.	Interfaz Node-Red.....	51
3.3.3.	Diseño de contrastación.....	52
3.4.	Técnicas e instrumentos de investigación .....	53
3.5.	Procesamiento y análisis de datos .....	54
a)	Fase 1 .....	54
b)	Fase 2 .....	54
c)	Fase 3 .....	54
d)	Fase 4 .....	55
e)	Fase 5 .....	55
f)	Fase 6 .....	55
4.1.	Consideraciones previas.....	55
4.2.	Resultados gráficos y numéricos. ....	59
4.2.1.	Sistema de autosintonización de 3 zonas.....	59
a)	Setpoint por motor de 60 RPM .....	59
•	Motor izquierdo superior .....	59
•	Motor derecho superior.....	61

•	Motor derecho inferior.....	62
•	Motor izquierdo inferior .....	64
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	65
•	Características en el dominio del tiempo .....	66
b)	Setpoint por motor de 70 RPM .....	67
•	Motor izquierdo superior .....	67
•	Motor derecho superior.....	68
•	Motor derecho inferior.....	70
•	Motor izquierdo inferior .....	71
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	73
•	Características en el dominio del tiempo .....	74
c)	Setpoint por motor de 80 RPM .....	74
•	Motor izquierdo superior .....	74
•	Motor derecho superior.....	76
•	Motor derecho inferior.....	77
•	Motor izquierdo inferior .....	79
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	80
•	Características en el dominio del tiempo .....	81
a)	Setpoint por motor de 90 RPM .....	82
•	Motor izquierdo superior .....	82
•	Motor derecho superior.....	83
•	Motor derecho inferior.....	85
•	Motor izquierdo inferior .....	86
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	88
•	Características en el dominio del tiempo .....	89
b)	Velocidad general de robot diferencial.....	89

• Setpoint de 16.336 cm/s .....	89
• Setpoint de 19.059 cm/s .....	90
• Setpoint de 21.782 cm/s .....	90
• Setpoint de 24.502 cm/s .....	91
• Características en el dominio del tiempo .....	91
4.2.2. Sistema de autosintonización de 5 zonas.....	92
a) Setpoint por motor de 60 RPM .....	92
• Motor izquierdo superior .....	92
• Motor derecho superior.....	93
• Motor derecho inferior.....	95
• Motor izquierdo inferior .....	96
• Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	98
• Características en el dominio del tiempo .....	99
b) Setpoint por motor de 70 RPM .....	99
• Motor izquierdo superior .....	99
• Motor derecho superior.....	101
• Motor derecho inferior.....	102
• Motor izquierdo inferior .....	104
• Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	105
• Características en el dominio del tiempo .....	106
c) Setpoint por motor de 80 RPM .....	107
• Motor izquierdo superior .....	107
• Motor derecho superior.....	108
• Motor derecho inferior.....	110
• Motor izquierdo inferior .....	111
• Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	113

•	Características en el dominio del tiempo .....	114
d)	Setpoint por motor de 90 RPM .....	114
•	Motor izquierdo superior .....	114
•	Motor derecho superior.....	116
•	Motor derecho inferior.....	117
•	Motor izquierdo inferior .....	119
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	120
•	Características en el dominio del tiempo .....	121
e)	Velocidad general de robot diferencial.....	122
•	Setpoint de 16.336 cm/s .....	122
•	Setpoint de 19.059 cm/s .....	122
•	Setpoint de 21.782 cm/s .....	123
•	Setpoint de 24.502 cm/s .....	123
•	Características en el dominio del tiempo .....	124
4.2.3.	Sistema de autosintonización de 7 zonas.....	124
a)	Setpoint por motor de 60 RPM .....	124
•	Motor izquierdo superior .....	124
•	Motor derecho superior.....	126
•	Motor derecho inferior.....	127
•	Motor izquierdo inferior .....	129
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	130
•	Características en el dominio del tiempo .....	131
b)	Setpoint por motor de 70 RPM .....	132
•	Motor izquierdo superior .....	132
•	Motor derecho superior.....	133
•	Motor derecho inferior.....	135



•	Motor izquierdo inferior .....	136
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	138
•	Características en el dominio del tiempo .....	139
c)	Setpoint por motor de 80 RPM .....	139
•	Motor izquierdo superior .....	139
•	Motor derecho superior.....	141
•	Motor derecho inferior.....	142
•	Motor izquierdo inferior .....	144
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	145
•	Características en el dominio del tiempo .....	146
d)	Setpoint por motor de 90 RPM .....	147
•	Motor izquierdo superior .....	147
•	.....	147
•	Motor derecho superior.....	148
•	Motor derecho inferior.....	150
•	Motor izquierdo inferior .....	151
•	Diferencia de velocidades del robot diferencial .....	153
•	Características en el dominio del tiempo .....	154
e)	Velocidad general de robot diferencial.....	154
•	Setpoint de 16.336 cm/s .....	154
•	Setpoint de 19.059 cm/s .....	155
•	Setpoint de 21.782 cm/s .....	155
•	Setpoint de 24.502 cm/s .....	156
•	Características en el dominio del tiempo .....	156
4.3.	Análisis e interpretación de resultados.....	157
4.4.	Docimasia de la hipótesis .....	159

<b>V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	159
<b>CONCLUSIONES</b> .....	161
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	162
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	163
<b>ANEXOS</b> .....	165
a) Tablas de recolección de datos. ....	165
b) Imágenes del robot móvil diferencial. ....	166
c) Diagrama de bloques del robot. ....	168
d) Programación del STM32 .....	168
e) Interfaz Node-Red .....	170
f) Programa en Matlab .....	174

### ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Circuito equivalente de motor DC. ....	7
Gráfico 2. Voltaje promedio de PWM con diferentes ciclos de trabajo. ....	9
Gráfico 3. Esquema cinemático de robot diferencial. ....	10
Gráfico 4. Esquema mecánico de trenes de rodaje. ....	12
Gráfico 5. Esquema de ruedas intermedias. ....	12
Gráfico 6. Coeficientes de fricción vs deslizamiento longitudinal. ....	13
Gráfico 7. Diagrama de bloques de sistema de control automático con PID. ....	14
Gráfico 8. Acción proporcional en sistema de control automático. ....	15
Gráfico 9. Acción integrativa en sistemas de control automático. ....	15
Gráfico 10. Funciones escalón e impulso. ....	17
Gráfico 11. Diagrama de bloques del control PI discreto. ....	18
Gráfico 12. Función tipo trapezoidal. ....	20
Gráfico 13. Función tipo singleton. ....	21
Gráfico 14. Función tipo triangular. ....	21
Gráfico 15. Función tipo S. ....	21
Gráfico 16. Función tipo campana. ....	22
Gráfico 17. Esquema de controlador difuso. ....	23
Gráfico 18. Caso de dos entradas para una regla difusa. ....	24
Gráfico 19. Sistema de control PI autosintonizado por lógica difusa. ....	25

Gráfico 20. Funciones de membresía de la interfaz de difusificación.....	26
Gráfico 21. Funciones de membresía de la interfaz de desdifusificación. ....	26
Gráfico 22. Funciones de pertenencia de difusificación del autosintonizador Ki. .	27
Gráfico 23. Funciones de pertenencia de la desdifusificación del autosintonizador Ki. ....	28
Gráfico 24. Sistema de control PI discreto autosintonizado por lógica difusa de un motor. ....	30
Gráfico 25. Zonas de difusificación de tres entradas.....	31
Gráfico 26. Curva de respuesta del motor.....	31
Gráfico 27. Zonas de desdifusificación del autosintonizador Kp del robot diferencial.....	33
Gráfico 28. Zonas de difusificación del autosintonizador Ki del robot diferencial.	34
Gráfico 29. Zonas de desdifusificación del autosintonizador Ki del robot diferencial.....	34
Gráfico 30. Recorte de zonas de desdifusificación en sus grados de pertenencia. .....	35
Gráfico 31. Contracción y superposición.....	36
Gráfico 32. Sistema de 3 zonas de difusificación para Kp. ....	42
Gráfico 33. Sistema de 3 zonas de desdifusificación para Kp.....	42
Gráfico 34. Sistema de 3 zonas de difusificación para Ki.....	43
Gráfico 35. Sistema de 3 zonas de desdifusificación para Ki.....	44
Gráfico 36. Sistema de 5 zonas de difusificación para Kp. ....	44
Gráfico 37. Sistema de 5 zonas de desdifusificación para Kp.....	45
Gráfico 38. Sistema de 5 zonas de difusificación para Ki.....	46
Gráfico 39. Sistema de 5 zonas de desdifusificación para Ki.....	46
Gráfico 40. Sistema de 7 zonas de difusificación para Kp. ....	47
Gráfico 41. Sistema de 7 zonas de desdifusificación para Kp.....	47
Gráfico 42. Sistema de 7 zonas de difusificación para Ki.....	49
Gráfico 43. Sistema de 7 zonas de desdifusificación para Ki.....	49
Gráfico 44. Plantilla de Node-Red para recepción de datos.....	52
Gráfico 45. Programación para recepción de datos y contabilización de tiempo en Node-Red.....	52
Gráfico 46. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	59

Gráfico 47. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior....	60
Gráfico 48. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior. ....	60
Gráfico 49. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	61
Gráfico 50. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. ...	61
Gráfico 51. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior.....	62
Gráfico 52. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	62
Gráfico 53. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. ....	63
Gráfico 54. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior. ....	63
Gráfico 55. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	64
Gráfico 56. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior.....	64
Gráfico 57. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. ....	65
Gráfico 58. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	65
Gráfico 59. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	66
Gráfico 60. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	67
Gráfico 61. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior... ..	67
Gráfico 62. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. ....	68
Gráfico 63. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	68
Gráfico 64. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. ....	69
Gráfico 65. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior.....	69
Gráfico 66. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	70
Gráfico 67. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. ....	70
Gráfico 68. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior. ....	71
Gráfico 69. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	71
Gráfico 70. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior.....	72
Gráfico 71. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. ....	72

Gráfico 72. Evolución temporal de la diferencia de velocidades entre motores inferiores.....	73
Gráfico 73. Evolución temporal de la diferencia de velocidades entre motores superiores.....	73
Gráfico 74. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	74
Gráfico 75. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior... 75	75
Gráfico 76. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior. ... 75	75
Gráfico 77. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	76
Gráfico 78. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. ... 76	76
Gráfico 79. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior..... 77	77
Gráfico 80. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	77
Gráfico 81. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. .... 78	78
Gráfico 82. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior. .... 78	78
Gráfico 83. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	79
Gráfico 84. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior..... 79	79
Gráfico 85. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. .... 80	80
Gráfico 86. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	80
Gráfico 87. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	81
Gráfico 88. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	82
Gráfico 89. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior... 82	82
Gráfico 90. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior. ... 83	83
Gráfico 91. Curva de respuesta del control de velocidad del motor derecho superior. ....	83
Gráfico 92. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. ... 84	84
Gráfico 93. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior..... 84	84
Gráfico 94. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	85

Gráfico 95. Evolución temporal del parámetro Kp del motor derecho inferior. ....	85
Gráfico 96. Evolución temporal del parámetro Ki del motor derecho inferior. ....	86
Gráfico 97. Curva de respuesta del control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	86
Gráfico 98. Evolución temporal del parámetro Kp del motor izquierdo inferior. ....	87
Gráfico 99. Evolución temporal del parámetro Ki del motor izquierdo inferior. ....	87
Gráfico 100. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores. ....	88
Gráfico 101. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores. ....	88
Gráfico 102. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 16.336 cm/s. ....	89
Gráfico 103. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 19.059 cm/s. ....	90
Gráfico 104. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 21.782 cm/s. ....	90
Gráfico 105. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 24.504 cm/s. ....	91
Gráfico 106. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	92
Gráfico 107. Evolución temporal del parámetro Ki del motor izquierdo superior. .	92
Gráfico 108. Evolución temporal del parámetro Kp del motor izquierdo superior. .	93
Gráfico 109. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	93
Gráfico 110. Evolución temporal del parámetro Kp del motor derecho superior. ..	94
Gráfico 111. Evolución temporal del parámetro Ki del motor derecho superior. ....	94
Gráfico 112. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	95
Gráfico 113. Evolución temporal del parámetro Ki del motor derecho inferior. ....	95
Gráfico 114. Evolución temporal del parámetro Kp del motor derecho inferior. ...	96
Gráfico 115. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	96
Gráfico 116. Evolución temporal del parámetro Kp del motor izquierdo inferior. ...	97
Gráfico 117. Evolución temporal del parámetro Ki del motor izquierdo inferior. ....	97

Gráfico 118. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	98
Gráfico 119. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	98
Gráfico 120. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	99
Gráfico 121. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior.	100
Gráfico 122. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	100
Gráfico 123. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	101
Gráfico 124. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior.	101
Gráfico 125. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior...	102
Gráfico 126. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	102
Gráfico 127. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. .	103
Gráfico 128. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	103
Gráfico 129. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	104
Gráfico 130. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior.	104
Gráfico 131. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. ...	105
Gráfico 132. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	105
Gráfico 133. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	106
Gráfico 134. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	107
Gráfico 135. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior.	107
Gráfico 136. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	108
Gráfico 137. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	108
Gráfico 138. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior.	109
Gráfico 139. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior..	109

Gráfico 140. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	110
Gráfico 141. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. .	110
Gráfico 142. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	111
Gráfico 143. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	111
Gráfico 144. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. .	112
Gráfico 145. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior. .	112
Gráfico 146. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	113
Gráfico 147. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	113
Gráfico 148. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	114
Gráfico 149. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior. .	115
Gráfico 150. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	115
Gráfico 151. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	116
Gráfico 152. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. .	116
Gráfico 153. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior..	117
Gráfico 154. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	117
Gráfico 155. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. .	118
Gráfico 156. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	118
Gráfico 157. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	119
Gráfico 158. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. .	119
Gráfico 159. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior. .	120
Gráfico 160. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	120
Gráfico 161. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	121



Gráfico 162. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 16.336 cm/s. ....	122
Gráfico 163. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 19.059 cm/s. ....	122
Gráfico 164. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 21.782 cm/s. ....	123
Gráfico 165. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 24.502 cm/s. ....	123
Gráfico 166. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	124
Gráfico 167. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior.	125
Gráfico 168. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	125
Gráfico 169. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	126
Gráfico 170. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior.	126
Gráfico 171. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior...	127
Gráfico 172. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	127
Gráfico 173. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. .	128
Gráfico 174. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	128
Gráfico 175. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	129
Gráfico 176. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior.	129
Gráfico 177. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. .	130
Gráfico 178. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	130
Gráfico 179. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	131
Gráfico 180. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	132
Gráfico 181. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	132
Gráfico 182. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior.	133

Gráfico 183. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	133
Gráfico 184. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. ....	134
Gráfico 185. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior.. ....	134
Gráfico 186. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	135
Gráfico 187. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. . ....	135
Gráfico 188. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	136
Gráfico 189. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	136
Gráfico 190. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior. ....	137
Gráfico 191. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. . ....	137
Gráfico 192. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	138
Gráfico 193. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	138
Gráfico 194. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	139
Gráfico 195. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	140
Gráfico 196. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior. ....	140
Gráfico 197. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	141
Gráfico 198. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior. ....	141
Gráfico 199. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior.. ....	142
Gráfico 200. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	142
Gráfico 201. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. . ....	143
Gráfico 202. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	143
Gráfico 203. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	144
Gráfico 204. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior. ....	144
Gráfico 205. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. . ....	145

Gráfico 206. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	145
Gráfico 207. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	146
Gráfico 208. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior. ....	147
Gráfico 209. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo superior. ....	147
Gráfico 210. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo superior.	148
Gráfico 211. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior. ....	148
Gráfico 212. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho superior.	149
Gráfico 213. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho superior..	149
Gráfico 214. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior. ....	150
Gráfico 215. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor derecho inferior. .	150
Gráfico 216. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor derecho inferior....	151
Gráfico 217. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior. ....	151
Gráfico 218. Evolución temporal del parámetro $K_p$ del motor izquierdo inferior.	152
Gráfico 219. Evolución temporal del parámetro $K_i$ del motor izquierdo inferior. .	152
Gráfico 220. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.....	153
Gráfico 221. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.....	153
Gráfico 222. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 16.336 cm/s. ....	154
Gráfico 223. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 19.059 cm/s. ....	155
Gráfico 224. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 21.782 cm/s. ....	155
Gráfico 225. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 24.502 cm/s. ....	156
Gráfico 226. Motores DC del robot.....	166

Gráfico 227. Placa del robot.....	166
Gráfico 228. Trenes de rodaje del robot.....	167
Gráfico 229. Robot diferencial en terreno agrícola.....	167
Gráfico 230. Diagrama de bloques del robot.....	168
Gráfico 231. Distribución de pines.....	168
Gráfico 232. Predisposición de funciones.....	169
Gráfico 233. Programación del motor derecho superior.....	169
Gráfico 234. Programación por bloques de la interfaz.....	170
Gráfico 235. Programación de recepción.....	171
Gráfico 236. Dashboard de Node-Red.....	171
Gráfico 237. Interfaz Node-Red con el robot diferencial sin contacto con el suelo .....	172
Gráfico 238. Interfaz Node-Red con el robot diferencial sin contacto con el suelo. .....	172
Gráfico 239. Interfaz Node-Red con el robot diferencial en terreno agrícola.....	173
Gráfico 240. Interfaz Node-Red con el robot diferencial en el terreno agrícola..	173
Gráfico 241. Programa en Matlab.....	174
Gráfico 242. Programa en Matlab.....	174
Gráfico 243. Programa en Matlab.....	175

### **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Tabla de reglas del sintonizador Kp.....	27
Tabla 2. Tabla de reglas del autosintonizador Ki.....	28
Tabla 3. Reglas de autosintonizador Kp del robot diferencial.....	32
Tabla 4. Reglas de autosintonizador Kp del robot diferencial.....	32
Tabla 5. Reglas del autosintonizador Ki del robot diferencial.....	34
Tabla 6. Variable independiente.....	40
Tabla 7. Variables dependientes.....	40
Tabla 8. Reglas de autosintonización difusa de 3 zonas para Kp.....	43
Tabla 9. Reglas de autosintonización difusa de 3 zonas para Kp.....	43
Tabla 10. Reglas de autosintonización difusa de 3 zonas para Ki.....	44
Tabla 11. Reglas de autosintonización difusa de 5 zonas para Kp.....	45
Tabla 12. Reglas de autosintonización difusa de 5 zonas para Ki.....	46
Tabla 13. Reglas de autosintonización difusa de 7 zonas para Kp.....	48

Tabla 14. Reglas de autosintonización difusa de 7 zonas para $K_p$ . .....	48
Tabla 15. Reglas de autosintonización difusa de 7 zonas para $K_i$ . .....	49
Tabla 16. Técnicas e instrumentos de recolección de datos. ....	53
Tabla 17. Ganancias críticas. ....	55
Tabla 18. Dimensiones del robot diferencial.....	56
Tabla 19. Etiquetas de la posición de los motores. ....	58
Tabla 20. Significado de notaciones de los resultados numéricos. ....	59
Tabla 21. Características en el dominio del tiempo de los motores para un setpoint de 60 RPM y autosintonización de 3 zonas. ....	66
Tabla 22. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 70 RPM y autosintonizados con 3 zonas. ....	74
Tabla 23. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 80 RPM y autosintonización de 3 zonas. ....	81
Tabla 24. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 90 RPM y autosintonizados para 3 zonas. ....	89
Tabla 25. Características en el dominio del tiempo de la velocidad general del robot diferencial autosintonizado con 3 zonas.....	91
Tabla 26. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 60RPM autosintonizados con 5 zonas. ....	99
Tabla 27. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 70RPM autosintonizados con 5 zonas. ....	106
Tabla 28. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 80RPM autosintonizados con 5 zonas. ....	114
Tabla 29. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 90RPM autosintonizados con 5 zonas. ....	121
Tabla 30. Características en el dominio del tiempo de la velocidad general del robot diferencial autosintonizado con 5 zonas.....	124
Tabla 31. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 60RPM autosintonizados con 7 zonas. ....	131
Tabla 32. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 70RPM autosintonizados con 7 zonas. ....	139
Tabla 33. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 80RPM autosintonizados con 7 zonas. ....	146

Tabla 34. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 90RPM autosintonizados con 7 zonas. ....	154
Tabla 35. Características en el dominio del tiempo de la velocidad general del robot diferencial autosintonizado con 7 zonas.....	156
Tabla 36. Almacenamiento de características en el dominio del tiempo, por respuesta de cada motor y sistemas de N zonas difusas. ....	165
Tabla 37. Almacenamiento de datos de la velocidad total del robot diferencial por sistema de zonas difusas. ....	165

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Problema de investigación

#### 1.1.1. Realidad problemática.

A partir de la fundación de grandes proyectos agrícolas en el Perú, tales como, CHAVIMOCHIC, PSI y SERFOR; así como la llegada de grandes trasnacionales agroindustriales como Danper, Camposol y Contilatin, la economía nacional experimentó un notable crecimiento en este rubro. Teniendo en consideración que la región, La Libertad, según el diario Gestión (2018), cuenta con altos índices de agroexportación, consecuentemente, surge la propuesta de optimizar la actividad agraria con la implementación robots recolectores, identificadores, de mapeo y exploración. Así mismo, estos sistemas complejos necesitan de una cinemática adecuada para su movimiento a lo largo de distintos terrenos que se encuentran en La Libertad, tanto de la sierra y costa. Por tales motivos, la implementación de un robot móvil tipo oruga, el cual cuenta con un sistema de trenes de rodaje, es justificable, según Rubio et. al (2019), este sistema es adaptable a todo terreno.

La cinemática del robot debe estar regida a un control de velocidad, el cual tiene que ser lo más funcional posible a la realidad agraria y sirva de base para un control de trayectoria. Debido a que estos sistemas se someten a terrenos irregulares con alta fricción, poseen un modelamiento matemático cambiante con coeficientes que varían en el tiempo y con un comportamiento no lineal, según Wit et. al (1993). Por ello, es tentativo implementar un control adaptativo que varíe sus parámetros con el fin de adaptarse a cambios en la dinámica del sistema y a perturbaciones; sin embargo, uno convencional necesita de suposiciones con respecto a la linealidad de parámetros de la planta junto con su dinámica, disponibilidad de una matriz de regresión y técnicas no lineales de análisis, según Landau et. al (2011). Además, no es conveniente para un robot móvil el uso de este controlador puesto que requiere alto consumo de recursos computacionales, debido a que se necesita resolver un problema de optimización en cada instante de muestreo, según Gonzales et. al (2016). Por otro lado, es propicio usar la inteligencia artificial para sintonizar los parámetros del controlador y

adaptarlos a los cambios que experimenta sistema, es así que, surge la propuesta de implementar un controlador basado en autosintonización por lógica difusa. Este controlador actúa sin consideración al modelo de la planta y toma en cuenta un conjunto de reglas condicionales de experiencia para deducir su acción de control, en consecuencia, es más versátil y simplifica el procesamiento en comparación a un control adaptativo convencional. Debido a que la lógica difusa se basa en la experiencia, es poco probable encontrar una relación matemática entre el desempeño del sistema junto con los parámetros que rigen la autosintonización, tales como, el número de zonas del sistema difuso, funciones de membresía y rangos de trabajo, según Bakhtiar & Mehrdadi (2012). Las funciones de membresía deben ser lineales y simétricas con el fin de optimizar la computarización, y el rango de trabajo tiende a ser fijado por la estabilidad del sistema; consecuentemente, el parámetro a variar es el número de zonas de difusificación-desdifusificación. Con tales esbozos, surge la problemática de contrastar el desempeño del sistema cinemático del robot en nuestra realidad agraria, en relación a cada uno de los controles de velocidad que posean autosintonización con los principales números de zonas difusas, los cuales son 3, 5 y 7; considerando igualdad de condiciones en cuanto a las funciones de membresía, rangos de trabajo y terreno a probar. Consecuentemente, es pertinente el planteamiento de una investigación que analice las características en el dominio del tiempo y la velocidad de desviación promedio correspondientes a las respuestas del sistema cinemático, relativas a cada control de velocidad con diferentes sistemas de autosintonización difusa.

#### 1.1.2. Enunciado del problema

Análisis del desempeño de controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa e implementados con los principales números de zonas de difusificación-desdifusificación, para un robot diferencial tipo oruga a diferentes velocidades; mediante las características en el dominio del tiempo y velocidad de desviación promedio, en un terreno agrícola de la región La Libertad.



### 1.1.3. Formulación del problema

¿Cuáles son las características en el dominio del tiempo y velocidad de desviación promedio correspondientes a controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa e implementados con los principales números de zonas de difusificación-desdifusificación, para un robot diferencial tipo oruga a diferentes velocidades y con desplazamiento en un terreno agrícola de la región La Libertad?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Encontrar las características en el dominio del tiempo y velocidad de desviación promedio de controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa e implementados con los principales números de zonas de difusificación-desdifusificación, para un robot diferencial tipo oruga a diferentes velocidades y con desplazamiento en un terreno agrícola de la región La Libertad.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar con qué sistema de zonas de difusificación-desdifusificación y a qué velocidad, el robot diferencial presenta un menor tiempo de asentamiento promedio de sus motores.
- Determinar con qué sistema de zonas de difusificación-desdifusificación y a qué velocidad, el robot diferencial presenta un menor porcentaje de sobrepaso máximo promedio de sus motores.
- Determinar con qué sistema de zonas de difusificación-desdifusificación, y a qué velocidad, el robot diferencial presenta un menor error estático promedio de sus motores.
- Determinar con qué sistema de zonas de difusificación-desdifusificación y a qué velocidad, el robot diferencial presenta una menor velocidad de desviación promedio de los dos pares de motores.
- Graficar las curvas de control, diferencia de velocidades y autosintonización de parámetros, correspondiente a cada motor del robot diferencial y a cada sistema de zonas de difusificación-desdifusificación, para todas las velocidades de prueba, en un terreno agrícola de La Libertad.

### 1.3. Justificación

De manera absoluta, esta investigación pretende realizar experimentación y análisis del desempeño del control de velocidad autosintonizado por lógica difusa correspondientes a cada número principal de zonas de difusificación-desdifusificación y para diferentes velocidades en un terreno agrícola de la región La Libertad. Esta investigación es relevante porque proporciona un sinceramiento práctico del rendimiento en el dominio del tiempo de cada autosintonización difusa con diferente número de zonas difusas. Tomando en cuenta que, teóricamente es casi imposible hallar una relación matemática entre las características en el dominio del tiempo de la respuesta de la planta y los parámetros de lógica difusa que rige la autosintonización; debido a ello, los productos experimentales del presente trabajo son de vital importancia para sentar bases empíricas en cuanto al diseño e implementación de controladores autosintonizados con desempeño en terrenos irregulares. De manera que, al lector, se le proporcione variedad de resultados y, en base a ello, pueda escoger el sistema de zonas difusas que más le convenga para su autosintonizador. Consecuentemente, puede llegar a ser de utilidad para el futuro desarrollo de robots móviles que se desempeñen en suelos agrícolas de La Libertad y debido a que la robótica aún no está bien cimentada en nuestro país, resulta de gran impulso. Los principales beneficiarios son las grandes empresas agroindustriales, debido que contarán con una base para el diseño cinemático de los robots móviles, los cuales, a largo plazo, reemplazarán la mano de obra orientada a la recolección. Por otro lado, esta investigación será un paso más en el desarrollo de la línea de investigación de Aplicaciones Robóticas de la Universidad Privada Antenor Orrego, y debido a la evolución tecnológica, esta tiene la obligación de crecer en cuestión de conocimiento aplicado.

## II. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1. Antecedentes:

Con la motivación de iniciar la investigación en base a los desarrollos e investigaciones previas, para asegurar aportar un nuevo y perfeccionado conocimiento, se evaluaron los siguientes antecedentes:

- a) Almeida y Coelho (2002), en su artículo titulado “A fuzzy logic method for autotuning: SISO and MIMO systems”, presenta un método para implementar un autosintonizador por lógica difusa sin requerir grandes dimensiones de reglas de varias entradas, las cuales podrían menguar el tiempo de procesamiento del controlador digital. Para ello, toma en cuenta el margen de fase del producto planta-controlador, de manera que logra una cancelación de polos y solo necesita variar la ganancia de fase para sintonizar los factores proporcional, integrativo y derivativo. Tal investigación aporta a la presente tesis, en cuanto a la proporción de reglas adecuadas para el sistema difuso, en relación con los parámetros de salida sintonizados correspondientes a solo dos entradas, error y su variación.
- b) Valencia et. al (2009), en su artículo titulado “Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica”, presenta un modelo matemático de un robot diferencial, además presenta una metodología de experimentación para probar su control de trayectoria, y medir ángulos de desviación. Su principal aporte a la presente investigación, radica en la evaluación por distancia y su rango de prueba para el control de todo el sistema móvil.
- c) Saeed & Mehrdadi (2012), en su artículo titulado “Design of an interactive auto-tuning algorithm for a fuzzy PID controller”, proporciona variantes, ventajas y desventajas a tomar en cuenta con respecto al control autosintonizado por lógica difusa, tales como, capacidad excesiva de computarización, grandes dimensiones de reglas y pocos criterios certeros respecto a parámetros del sistema difuso. Tales afirmaciones contribuyen en la teorización de la presente tesis.
- d) González et. al (2015) en su investigación “Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control” se propone un modelado de

la cinemática del robot móvil. Esta investigación, brinda el soporte teórico necesario para establecer, en la presente tesis, la pertinencia de usar un sistema oruga (trenes de rodaje) para la cinemática del robot.

- e) Contreras et al. (2016) en su artículo titulado “Control de velocidad de motor DC utilizando Lógica Difusa”. Declara los pasos para desarrollar un controlador difuso, siendo el primero, el modelamiento matemático del motor, no con el motivo de desarrollar el controlador ya que no es necesario para la lógica difusa, sino para poder simularlo. Posteriormente se diseña el controlador mediante el Fuzzy Logic Toolbox. Por último, se simula en el software Simulink. Como resultado, el controlador propuesto presentó menos del 1 % de error en porcentaje de sobrepaso. Este artículo aporta conocimiento a la tesis, mostrando la factibilidad de la implementación de lógica difusa para el control de velocidad de un motor DC, como los que se usan en el robot. Así mismo, muestra las ventajas de usar un controlador difuso, como la facilidad de implementación, el rápido tiempo de establecimiento y el mínimo porcentaje de error.
- f) Boru & Wang (2017) en su investigación “Design and Control for Differential Drive Mobile Robot”, propone un modelamiento matemático para un robot diferencial, así como su controlador de velocidad PID, para lo cual, empleó sistemas de ecuaciones diferenciales. Además, expone la ecuación de velocidad general promedio de un robot diferencial, así como, la conversión de velocidad angular a lineal, tales expresiones son empleadas en la presente tesis.
- g) Nurmaini & Chusniah (2017), en su artículo titulado “Differential Drive Robot Control using Variable Fuzzy Universe of Discourse”, brinda reglas de lógica difusa para un robot diferencial en cuanto al control de velocidad y la corrección de ángulos de desviación. Este artículo aporta una organización de resultados en la Tabla N°2, la cual es adecuada a usar en la presente investigación.
- h) Sotelo (2020), en su tesis titulada “Implementación de un robot explorador con realidad virtual para incrementar la seguridad de la institución educativa 7213 peruano japonés en el distrito de Villa El Salvador-2020”,

presenta fundamentos teóricos de los trenes de rodaje, usados por el presente trabajo.

- i) Chávez & Chávez (2021), en tesis titulada “Diseño e implementación de un controlador difuso en controladores lógicos programables utilizando el método del centroide”, más allá de algunas carencias, proporciona una metodología adecuada de codificación para implementar lógica difusa junto con fórmulas pertinentes de difusificación y desdifusificación, funcionales para un procesador digital, empleadas en la presente tesis.
- j) García (2022), en su tesis doctoral titulada “Controlador de tracción en lógica difusa para un robot móvil”, presenta los comportamientos no lineales ligados a la fricción del suelo, junto con el uso de autosintonización difusa, y evolución en tiempo real de las ganancias proporcional y derivativa. Tal trabajo junto con su exegesis brinda un ejemplo de resultados para la presente tesis.

## 2.2. Marco teórico

### 2.2.1. Motor DC en sistemas de control:

Un motor DC es una máquina eléctrica capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica, expresada mediante el movimiento rotativo de su rotor. Se utiliza frecuentemente en los sistemas de control debido a que es sencillo poder regular su velocidad. En el Gráfico 1, podemos visualizar el circuito equivalente de un motor DC, teniendo en consideración el circuito de armadura donde se presenta el rotor y el campo fijo del estator. El inductor  $L_f$  tiene la labor de producir el flujo magnético y el rotor es el inducido.

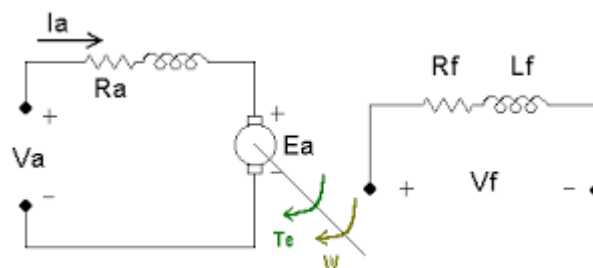


Gráfico 1. Circuito equivalente de motor DC.

El par electromagnético viene expresado por la siguiente ecuación:

$$T_e = k_i i_a \Phi \dots (1)$$

Donde  $\Phi$  es el flujo magnético, producido en el estator.

Cuando el rotor empieza a girar, aparece un voltaje inducido proporcional a la velocidad angular y a la corriente de excitación, con la siguiente ecuación:

$$E_a = k_b w \Phi \dots (2)$$

Efectuando la Segunda Ley de Kirchhoff, tenemos:

$$V_a = i_a R_a + E_a \dots (3)$$

Donde el voltaje del inductor en serie a  $R_a$  se ha despreciado ya que en la práctica tiene un valor muy reducido.

Reemplazando y despejando la velocidad angular, tenemos:

$$w = \frac{V_a - i_a R_a}{k_b \Phi} \dots (4)$$

Podemos denotar que conforme aumentamos el voltaje en las terminales del rotor,  $V_a$ , la velocidad de este aumentará en relación lineal, siempre y cuando, consideremos al flujo constante.

a) Modulación por ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulso, es una técnica en la cual se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, es decir, se aumenta o se disminuye la parte activa (positiva de la onda), de forma que el ciclo de trabajo varía según la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\tau}{T} \times 100\% \dots (5)$$

Donde

$D$  es el ciclo del trabajo.

$\tau$  es el tiempo activo.

$T$  es el período.

Se utiliza como salidas analógicas en los microcontroladores, debido a que puede obtenerse un voltaje promedio de la siguiente manera:

$$V_{dc} = V_{cc} \frac{D}{100\%} \dots (6)$$

En el Gráfico 2, se puede visualizar los voltajes DC promedio para cada ciclo de trabajo:

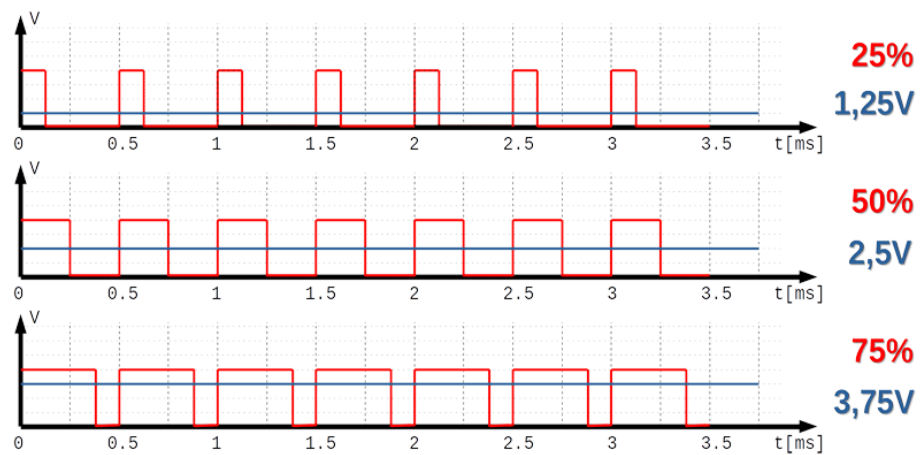


Gráfico 2. Voltaje promedio de PWM con diferentes ciclos de trabajo.

Consecuentemente, se puede variar en un rango que tenga como máximo a la alimentación del circuito integrado. Resulta útil para ejercer control sobre un motor DC, siempre y cuando, se cuente con un driver de potencia que magnifique por un factor proporcional la salida PWM, y brinde suficiente corriente.

b) Codificador rotativo

Un codificador rotativo o encoder, es un generador de pulsos, y se usa como sensor de velocidad para motores DC, con el objetivo de leer su velocidad en RPM. Dentro de los principales, esta el encoder de rotación incremental, el cual proporciona pulsos en forma de onda cuadrada y genera un determinado número de estos por revolución, de manera que, debe conectarse a un contador del microcontrolador, con el fin de obtener los pulsos contados durante una interrupción; y así, deducir la velocidad del motor. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$RPM = \frac{\text{Pulsos contados}}{\text{Pulsos por revolución}} \left( \frac{60s}{t_{int}} \right) \dots (7)$$

Donde *RPM* son las revoluciones por minuto.

### 2.2.2. Cinemática de robot diferencial

Un robot diferencial es aquel robot móvil que cuenta comúnmente con dos ruedas motrices. Los vehículos más grandes cuentan con un par de ruedas en cada lado, cada par de ruedas laterales tienden a tener una misma velocidad. Además, acorde al terreno pueden utilizar trenes de rodaje en lugar de ruedas comunes. Este tipo de robot móvil cuenta con la particular característica que la diferencia de velocidades entre un lado y otro origina giros en la trayectoria del móvil.

Tal como muestra el Gráfico 3, el robot cambia su dirección alrededor de un centro de rotación externo, siempre y cuando, se suscite una diferencia de velocidad. Donde  $R_L$  y  $R_R$ , son los radios de giro relativos a las velocidades  $v_L$  y  $v_R$ , respectivamente, tomando como centro de rotación al punto ICR.

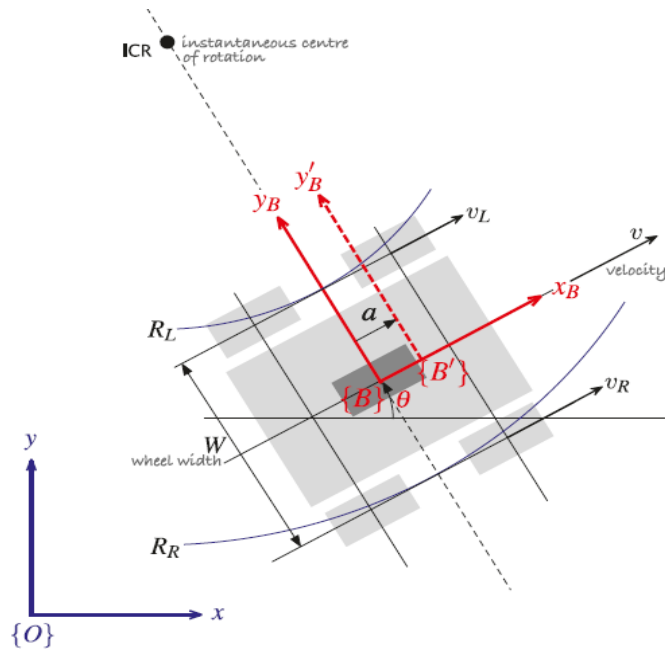


Gráfico 3. Esquema cinemático de robot diferencial.

La velocidad angular del centro del robot,  $B$ , considerando  $v_L$  y  $v_R$  como velocidades tangenciales, es:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v_L}{R_L} = \frac{v_R}{R_R} \dots (8)$$

Además, se tiene la siguiente relación de distancias:



$$R_R = R_L + W \dots (9)$$

Entonces se podría hallar la siguiente relación:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v_R - v_L}{W} \dots (10)$$

Por otro lado, según Corke (2011), se puede describir como velocidad total general del robot a  $v$ , de la siguiente manera:

$$v = \frac{(v_R + v_L)}{2} \dots (11)$$

En caso se posea las velocidades angulares en RPM, es posible hacer una conversión a m/s con el objetivo de poder usar las ecuaciones descritas, de la siguiente forma:

$$v = \frac{2\pi r(RPM)}{60s} \dots (12)$$

Donde  $r$  es el radio en metros.

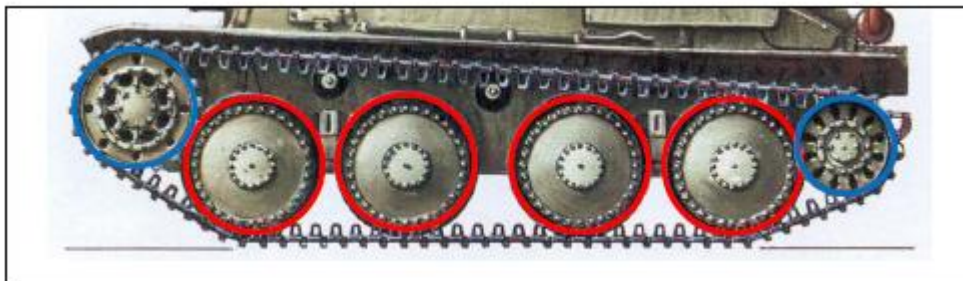
### 2.2.3. Trenes de rodaje y fricción.

#### a) Mecánica de los trenes

Los trenes de rodaje, o también llamados orugas, hacen uso de pistas de deslizamiento, lo que implica una mayor área de contacto con el terreno; y, por tanto, supone una mejor tracción y maniobrabilidad que las ruedas comunes, para terrenos no consistentes. Según Gonzales et. al (2016), ofrece las siguientes ventajas:

- Versatilidad de operación sobre diversos tipos de terrenos e incluso en diferentes condiciones meteorológicas.
- Baja presión en el suelo, incluso ante una elevada carga, lo que llega a conservar mejor el terreno en el que opera el vehículo.
- Previene posibilidades de que el vehículo quede estancado en arena o nieve.
- El centro de gravedad del vehículo se mantiene bajo, debido a ello, se consigue una buena estabilidad y movilidad.

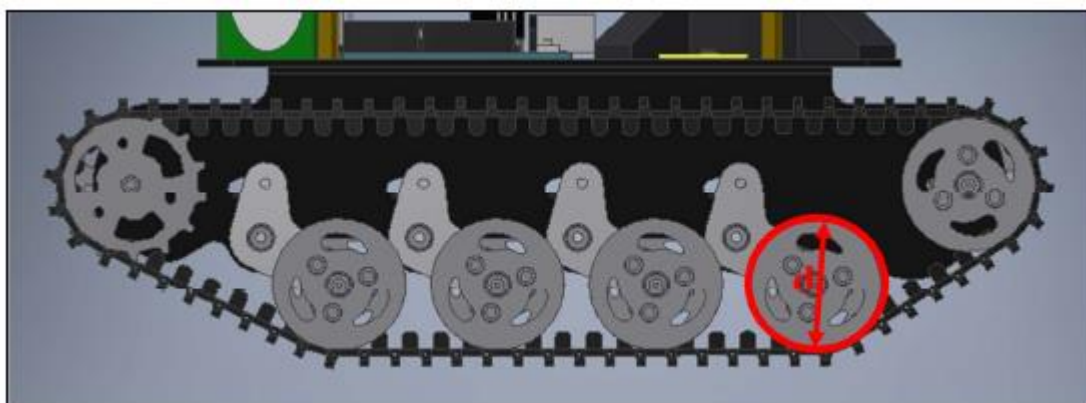
Por otro lado, este sistema de movimiento también tiene algunos puntos débiles como es la excesiva potencia que consume. Se tiene el siguiente esquema mecánico:



*Gráfico 4. Esquema mecánico de trenes de rodaje.*

Las ruedas rojas son las intermedias que se encargan de amortiguar las irregularidades del suelo y dar estabilidad al robot cuando ejerce su desplazamiento. Las ruedas azules son las dentadas y están conectadas al motor, sirven para transmitir potencia de un lugar a otro sin perder tracción, dado que los dientes evitan el deslizamiento de la pista.

Según Sotelo, G. (2020), la velocidad lineal del sistema es determinado por las ruedas intermedias. A partir del siguiente gráfico:



*Gráfico 5. Esquema de ruedas intermedias.*

Se toma en consideración que las ruedas intermedias poseen las mismas dimensiones, se plantea la siguiente ecuación:

$$V = \frac{wd}{2} = wr \dots (13)$$

Donde  $w$  es la velocidad angular del motor, conectado a la rueda dentada, que mueve a toda la pista. Consecuentemente, todas las ruedas intermedias compartirán la misma velocidad y carga. Esta velocidad, será la que dirija todo el sistema del tren de rodaje.

## b) Fricción

La fricción es el mecanismo principal para generar fuerza en el vehículo, y es la fuerza que existe entre dos superficies de contacto. Resulta ser clave tener una caracterización de la fuerza de fricción en la interfaz suelo/neumático, ya que funciona como medio de conversión a la aceleración o desaceleración de la rueda en aceleración o desaceleración hacia adelante. Un factor importante a tener en cuenta es la fricción de las llantas normalizada, según la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{F}{F_n} = \frac{\text{Fuerza de fricción}}{\text{Fuerza normal}} \dots (14)$$

Una suposición clásica es que este factor es una función no lineal del deslizamiento longitudinal ( $s$ ). Según García (2022), en un laboratorio usando vehículos de prueba, se obtuvo los siguientes gráficos del coeficiente de fricción.

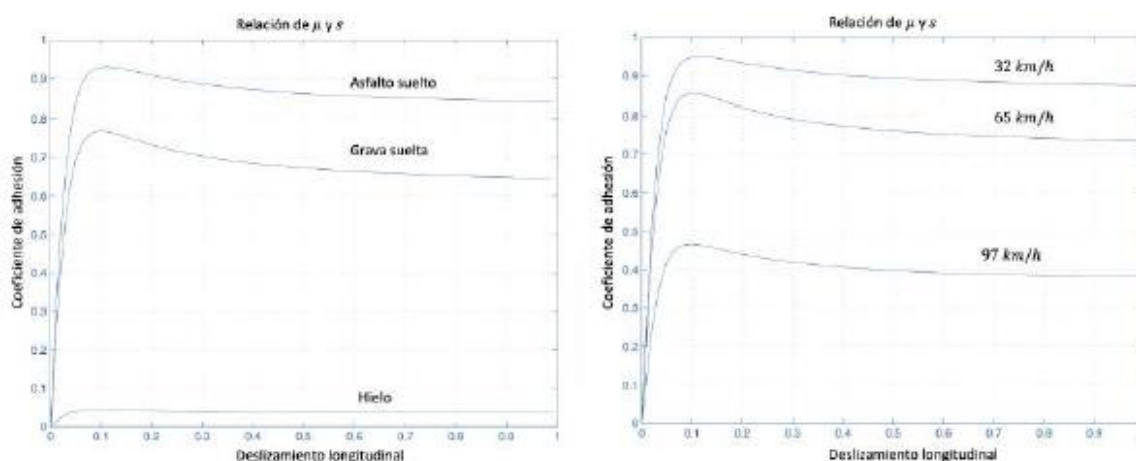


Gráfico 6. Coeficientes de fricción vs deslizamiento longitudinal.

Se exhibe un comportamiento transitorio al inicio y varía según las velocidades. La fuerza fricción en la interfaz rueda /superficie para los terrenos graficados, es en gran medida un fenómeno dinámico. Es importante mencionar, que los terrenos agrícolas suelen ser parecidos o más irregulares que al asfalto suelto y poseedores de relieves abruptos en gran contraste con el terreno usado para las mediciones, de forma que el comportamiento del coeficiente de fricción será mucho más variante. Además, tal como se observa, la fricción también cambiará en

relación a las velocidades del móvil, de manera que, el modelo de la planta será dinámico y expuesto a perturbaciones.

#### 2.2.4. Control PID

Se denomina control PID al bloque del controlador que implementa la suma de las acciones de control proporcional, integral y derivativa, y su salida posee la siguiente forma:

$$PID(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{K_d de(t)}{dt} \dots \quad (15)$$

Tiene como principal propósito establecer en la planta un estado igual al valor de referencia (setpoint). Donde  $e(t)$ , es el error en el dominio del tiempo entre el setpoint y la salida de la planta. Usualmente, se le expresa en el dominio complejo de Laplace, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} PID(s) &= \int_0^\infty \left\{ K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{K_d de(t)}{dt} \right\} e^{-st} dt \\ &= E(s)K_p + \frac{E(s)K_i}{s} + E(s)K_d s \dots \quad (16) \end{aligned}$$

Tenemos su expresión en el diagrama de bloques de la siguiente forma:

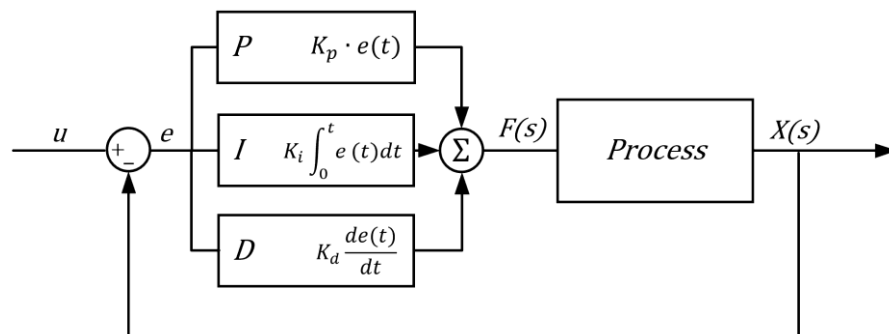


Gráfico 7. Diagrama de bloques de sistema de control automático con PID.

Es importante acotar que  $K_p, K_i$  y  $K_d$ , son constantes y se les denomina ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente.

##### a) Acción de control proporcional

La acción de control proporcional es básicamente un amplificador del error con ganancia  $K_p$  ajustable; de manera que, otorgará rapidez a la respuesta del sistema. Teniendo como ejemplo, el siguiente sistema de control:

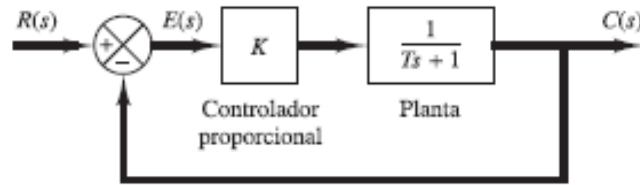


Gráfico 8. Acción proporcional en sistema de control automático.

Para una entrada escalón  $R(s) = \frac{1}{s}$ , puede deducirse la función error en el dominio de Laplace, que será:

$$E(s) = \frac{Ts + 1}{(Ts + 1 + K_p)s} \dots (17)$$

Donde su error en estado estacionario vendrá dado por:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{Ts + 1}{Ts + 1 + K_p} = \frac{1}{K_p + 1} \dots (18)$$

Siempre habrá error en estado estacionario. Si se opta por reducirlo, aumentando la ganancia proporcional, se ocasionará sobreelongaciones elevadas con pérdida de estabilidad.

b) Acción de control integral

La acción de control integral puede definirse como una acción que es proporcional a la integral (sumatoria) del error respecto al tiempo.

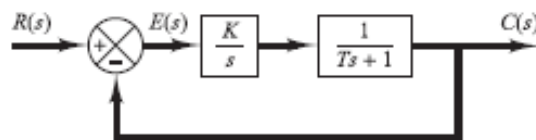


Gráfico 9. Acción integrativa en sistemas de control automático.

A partir del Gráfico 9, para la planta de primer orden, podemos deducir la siguiente expresión del error, para una entrada escalón:

$$E(s) = \frac{s(Ts + 1)}{s(Ts + 1) + K_i} \left( \frac{1}{s} \right) \dots (19)$$

Tenemos el error en estado estacionario:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(Ts + 1)}{s(Ts + 1) + K_i} = 0 \dots (20)$$

Tal como se pudo comprobar, la acción integral elimina el error estacionario hasta hacerlo cero. Si consideramos a la planta de orden  $m$ , mediante la siguiente expresión:

$$P(s) = \frac{\prod_{j=0}^n (s - a_j)}{\prod_{j=0}^m (s - a_j)}, \quad m > n \dots (21)$$

Con un  $R(s) = \frac{1}{s}$ , tenemos el error:

$$E(s) = \frac{\prod_{j=0}^n (s - a_j)}{s \prod_{j=0}^m (s - a_j) + K_i \prod_{j=0}^n (s - a_j)} \dots (22)$$

Evaluando el error estacionario:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \prod_{j=0}^n (s - a_j)}{s \prod_{j=0}^m (s - a_j) + K_i \prod_{j=0}^n (s - a_j)} = 0 \dots (23)$$

### c) Acción de control derivativo

La acción de control derivativo puede definirse como una acción que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Se tiene que asociar a la acción proporcional, de forma que esta ocasione los cambios en la respuesta del sistema, es así como tenemos la siguiente ecuación:

$$PD = K_p e(t) + \frac{K_d de(t)}{dt} \dots (24)$$

La inercia del sistema hace que se susciten sobrepasos ante una acción proporcional, y para sistemas muy rápidos como procesos de gases estos sobrepasos se pueden convertir en oscilaciones. Es necesario usar un derivativo, de manera que este a la par de la velocidad del cambio del error y se oponga al crecimiento acelerado, volviendo el sistema más estable. En esencia, anticipa al error y ocasiona una

prematura corrección. Sin embargo, es importante acotar que la acción derivativa puede ocasionar una inestabilidad inicial, gracias a su respuesta impulso ante una entrada escalón, lo cual ocurre con el error en el tiempo cero de activación del controlador.

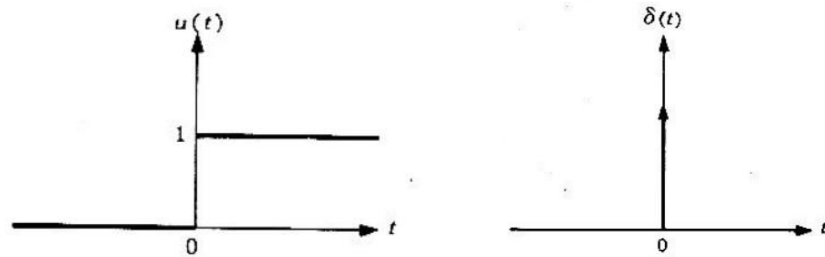


Gráfico 10. Funciones escalón e impulso.

$$\frac{du(t)}{dt} = \delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \dots (25)$$

Debido a la inestabilidad inicial que puede ocasionar, así como su dificultad para sintonizar, se suele omitir el uso del derivativo a sistemas que necesiten anticipación futura o que sean muy rápidos, un criterio común es la aplicación a plantas con una respuesta que sobrepase al setpoint en menos de un milisegundo.

### c) Sintonización de ganancias

Las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , son los parámetros a variar en el controlador con el fin de mejorar la respuesta de la planta o volverla inestable. Sintonizar estas ganancias es de vital importancia, puesto que, tomando en cuenta el modelo de la planta, podemos hacer que el proceso mejore sus características en el dominio del tiempo de acuerdo a los requerimientos. El principal método para asegurar estabilidad es el de Ziegler-Nichols, en el cual se anula las acciones de control del integrativo y derivativo, de forma que, solo se tiene la acción proporcional; se aumenta  $K_p$  hasta que el sistema comienza a oscilar, a este valor se denomina  $K_{cr}$  crítico. A partir de este valor, se halla con el modelo de la planta en el dominio de Laplace, la pulsación crítica,  $w_{cr}$ , junto con su

período crítico,  $T_{cr}$ . Con estos valores podemos hallar las ganancias, con las siguientes ecuaciones:

$$K_p = 0.6K_{cr} \dots (26)$$

$$K_d = 0.125T_{cr}K_p \dots (27)$$

$$K_i = \frac{K_p}{0.5T_{cr}} \dots (28)$$

Existen métodos más refinados que permiten otorgar al sistema, características en el dominio del tiempo específicas. Dentro de los cuales están: la sintonización por lugar geométrico de raíces, margen de fase, ábaco de Nichols, diagramas de Bode, etc. Todos los mencionados, toman en cuenta el modelo de la planta y lo idealizan a una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes no variantes en el tiempo, ya que tal condición es necesaria para analizar el sistema en el dominio complejo de Laplace.

#### 2.2.5. Control PI discreto

Con el fin de evitar el uso de circuitos electrónicos con opamps, capacitores y resistencias, lo cual ocupa espacio, así como tiempo en implementación y escasa versatilidad para modificar las ganancias, se debe optar por situar el controlador en un procesador digital, con el motivo de implementar las acciones de control mediante programación, así como su accionar en tiempos discretos. Para modelarlo, se tiene que discretizar la entrada y la salida del controlador para un determinado tiempo de muestreo,  $T_s$ , y añadir en serie, un bloque de muestreo y retención, por consiguiente, tenemos el siguiente diagrama de bloques:

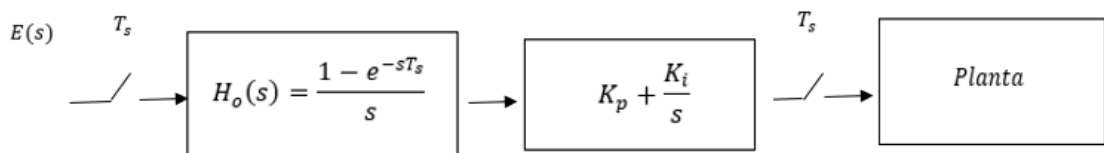


Gráfico 11. Diagrama de bloques del control PI discreto.



Bajo el motivo de implementar el controlador mediante una ecuación en diferencias, la cual es fácil de procesar para el elemento digital, discretizamos la señal de entrada y aplicamos la transformada Z.

Considerando la definición de la transformada Z:

$$X(z) = Z\{x(nT_s)\} = Z\{x[n]\} = \sum_{n=0}^{\infty} x[n]z^{-n} \dots (29)$$

Entonces se puede operar de la siguiente manera al controlador:

$$PI(z) = E(z)Z\left\{\frac{1 - e^{-sT_s}}{s}\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)\right\} = E(z)(1 - z^{-1})Z\left\{\frac{K_p}{s} + \frac{K_i}{s^2}\right\}$$

$$PI(z) = \frac{E(z)(1 - z^{-1})\{K_p(1 - z^{-1}) + K_iT_s z^{-1}\}}{(1 - z^{-1})^2}$$

$$PI(z)(1 - z^{-1}) = E(z)\{K_p(1 - z^{-1}) + K_iT_s z^{-1}\} \dots (30)$$

Aplicando la transformada inversa, tenemos:

$$Z^{-1}\{PI(z)(1 - z^{-1})\} = Z^{-1}\{E(z)\{K_p(1 - z^{-1}) + K_iT_s z^{-1}\}\}$$

$$PI(n) = PI(n - 1) + E(n)(K_p) - E(n - 1)(K_p - K_iT_s) \dots (31)$$

Esta última expresión es la ecuación en diferencias a implementar en el procesador digital del controlador PI discreto.

## 2.2.6. Lógica difusa

### a) Definición

La lógica difusa es una lógica que permite resolver información imprecisa, por ejemplo, estados como tibio, medianamente frío o caliente. De forma que, los datos ya no se clasifican por entero como verdadero o falso (1 o 0) en un conjunto, sino que en estados intermedios e imprecisos de conjuntos difusos. Para cada conjunto o subconjunto difuso se define una función de pertenencia que indica el grado en que una variable está incluida en el concepto o conjunto difuso.

En un conjunto clásico algo está completamente incluido en el o no lo está, tal estado puede describirse asignando un 1 a todos los elementos dentro; y un 0, a los que no lo están. Pero para los conjuntos difusos, la función de pertenencia asigna grados de pertenencia, de manera que,

se asigna valores entre 0 y 1; con el objetivo de describir matemáticamente estados intermedios.

b) Funciones de pertenencia

La función de pertenencia de un conjunto difuso es un conjunto de pares ordenados, descritos de la siguiente manera:

$$F = \{(u, \mu_F(u)) | u \in U\} \dots (32)$$

Entiéndase que el valor de  $\mu_F(u)$ , indica el grado en que el valor  $u$ , de la variable  $U$  está incluida en el concepto representado por la etiqueta  $F$ . Por ejemplo,  $U$  vendría a ser la temperatura;  $u$ , su valor numérico,  $\mu_F(u)$ , el grado de pertenencia que tiene hacia conceptos de caliente, tibio o frío, donde estos últimos vendrían a ser las etiquetas, conceptos o conjuntos difusos. La variable  $U$ , se le llama universo de discurso, y es la dimensión de todos los valores numéricos de  $u$ . Las principales funciones de pertenencia son las siguientes:

- Función tipo trapezoidal:

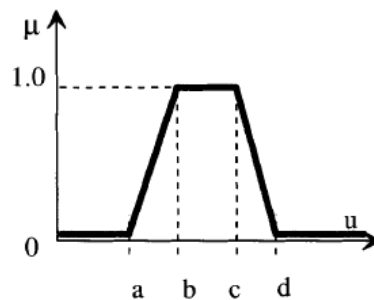


Gráfico 12. Función tipo trapezoidal.

Matemáticamente se le describe de la siguiente manera:

$$S(u, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & , u < a \\ \frac{u - a}{b - a} & , a \leq u \leq b \\ 1 & , b \leq u \leq c \\ \frac{d - u}{d - c} & , c \leq u \leq d \\ 0 & , u > d \end{cases} \dots (33)$$

- Función tipo singleton:

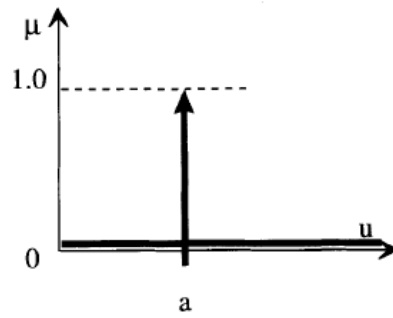


Gráfico 13. Función tipo singleton.

Su formulación vendría de la siguiente manera:

$$S(u, a) = \begin{cases} 1, & u = a \\ 0, & u \neq a \end{cases} \dots (34)$$

- Función tipo triangular:

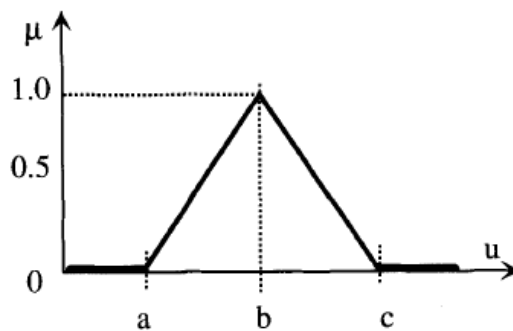


Gráfico 14. Función tipo triangular.

Su formulación vendría de la siguiente forma:

$$T(u, a, b, c) = \begin{cases} 0, & u < a \\ \frac{u - a}{b - a}, & a \leq u \leq b \\ \frac{c - u}{c - b}, & b \leq u \leq c \\ 0, & u > c \end{cases} \dots (35)$$

- Función de tipo S:

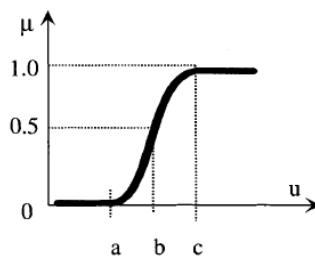


Gráfico 15. Función tipo S.

Su formulación esta en la siguiente expresión:

$$S(u, a, b, c) = \begin{cases} 0, & u < a \\ 2 \left( \frac{u-a}{c-a} \right)^2, & a \leq u \leq b \\ 1 - 2 \left( \frac{u-a}{c-a} \right)^2, & b \leq u \leq c \\ 1, & u > c \end{cases} \dots (36)$$

- Función tipo campana:

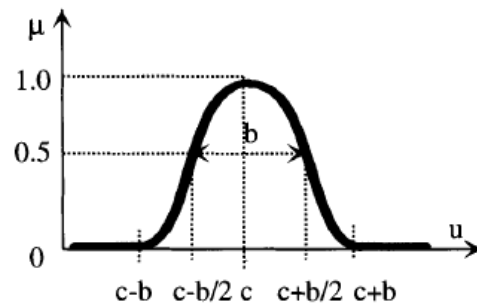


Gráfico 16. Función tipo campana.

Su formulación se muestra en la siguiente expresión:

$$\pi(u, b, c) = \begin{cases} S\left(u, c-b, \frac{c-b}{2}, c\right), & u \leq c \\ 1 - S\left(u, c-b, \frac{c-b}{2}, c\right), & u \geq c \end{cases} \dots (37)$$

Según Martín del Brío & Sanz (2006), la función más usada en los controladores difusos es la triangular, puesto que presenta un comportamiento lineal y simétrico; lo cual, le da versatilidad de programación y procesamiento. La función no lineal de tipo campana, puede ser aproximada a una triangular.

### c) Variable lingüística.

La variable lingüística se puede decir que son términos del lenguaje natural, tales como, poco, mucho, demasiado, etc., y son las etiquetas de un conjunto difuso. Según Chávez &Chávez (2021), esta variable permite describir en palabras, el comportamiento de una variable numérica, tal descripción son los conjuntos difusos. Además, representa el dominio de valores de una entrada numérica, por ejemplo, si se quiere representar velocidades de un motor:

$$0 \leq V \leq 10RPM \in Lento$$

$10RPM < V \leq 50RPM \in$  *Levemente rápido*

$50RPM < V \leq 80RPM \in$  *Rápido*

$80RPM < V \leq 100RPM \in$  *Muy rápido*

d) Estructura básica de un controlador difuso.

Un controlador difuso está conformado de cuatro partes fundamentales, las cuales son: interfaz de difusificación, base de conocimientos, lógica de decisiones e interfaz de desdifusificación, lo podemos observar en el siguiente esquema:

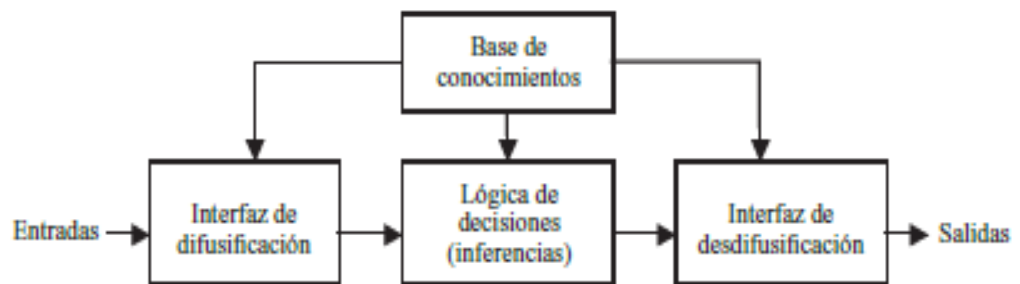


Gráfico 17. Esquema de controlador difuso.

e) Interfaz de difusificación

La interfaz de difusificación establece una relación entre los valores numéricos de entrada y conjunto difusos. De manera que, permite la conversión de valores numéricos a la variable lingüística o de etiqueta, y asigna un grado de pertenencia a tal conjunto, tomando en cuenta las funciones de pertenencia.

f) Lógica de decisiones y base de reglas

Es la que se encarga de relacionar los conjuntos difusos de entrada con los conjuntos difusos de salida. Normalmente se asocian con premisas de conjuntivas lógicas. Las reglas típicas suelen ser condicionales IF-THEN y expresan el conocimiento que se dispone sobre la relación entre las premisas de entrada, y las salidas. Tal conocimiento viene dado por la experiencia o análisis del operador, y se precisa tener varias reglas a las que se denomina base de reglas. Suelen ser representadas en tablas de doble entrada. Cuando el número de conjuntos de entrada crece, la base de reglas se hace difícilmente manejable. Las reglas son una colección  $R^{(l)}$  con el siguiente formato:

$R^{(l)}: IF x_1 \text{ is } F_1 \text{ and } \dots \text{ and/or } x_n \text{ is } F_n \text{ THEN } y \text{ is } G$

Entiéndase que la condición viene formada por las entradas y su asignación a los conjuntos difusos, lo más común, es considerar una entrada o como máximo dos entradas por la facilidad de manejo y procesamiento. En el condicionante, las entradas se pueden asociar entre sí con un AND o un OR. El grado de pertenencia para una entrada es el mismo que para la salida, "y". Tal como muestra el Gráfico 18, en caso haya varias entradas, el grado de pertenencia de salida resulta ser el producto de los grados de pertenencias de las entradas.

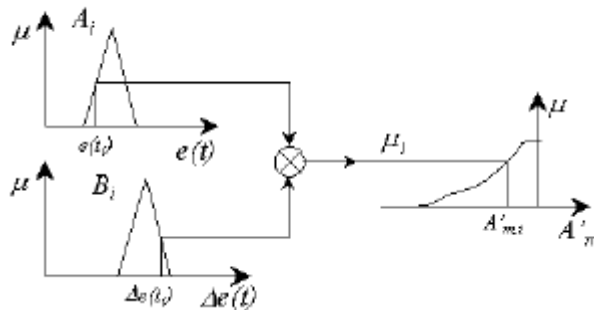


Gráfico 18. Caso de dos entradas para una regla difusa.

g) Base de conocimientos

La base de conocimientos es la que establece el conjunto de reglas, y viene dado por la experiencia o análisis del operador. Además, rige las interfaces de difusificación y desdifusificación, en sus funciones de pertenencia y sus rangos de acción.

h) Interfaz de desdifusificación

Tiene el propósito de transformar, a partir de conjuntos difusos con determinados grados de pertenencia, en una salida numérica aplicable al sistema de control.

i) Principio de extensión

El principio de extensión es la base de inferencia en los sistemas difusos, rige la relación entre dos conjuntos difusos de diferente universo de discurso. Sean  $U$  y  $V$  dos universos de discurso, y  $f$  una función de  $U$  a  $V$ . Para un conjunto difuso  $A$  en  $U$ , el principio define un conjunto borroso  $B$  en  $V$ , dado por:

$$\mu_B(v) = \sup_{u \in f^{-1}(v)} [\mu_A(u)] \dots (38)$$

Donde  $\mu_B(v)$  es el máximo de  $\mu_A(u)$ , para todos los  $u \in U$  que cumplen con  $f(u) = v$ , donde  $v \in V$  y se supone que  $f^{-1}(v)$  no es vacío. En caso  $f^{-1}(v)$  sea vacío para algún  $v$ , se tendrá  $\mu_B(v) = 0$ . Este principio rige, la relación de grados de pertenencia entre la interfaz de difusificación; y, la de desdifusificación. En caso se tenga dos entradas con distintos universos de discurso, pero se mapean a una sola salida, según Almeida & Coelho (2002), se evalúa en el argumento, el producto de ambos grados de pertenencia de los discursos de entrada:

$$\mu_B(v) = \sup_{(u,t) \in f^{-1}(v)} [\mu_A(u)\mu_H(t)] \dots (39)$$

### 2.2.7. Autosintonización por lógica difusa

#### a) Autosintonización de un control PI

La autosintonización por lógica difusa, es la variación de las ganancias del controlador y su sintonización de forma continua, basándose en lógica difusa y actuando en cada iteración del sistema de control, de manera que este gane adaptabilidad ante cambios de la planta o perturbaciones. Es así como se tiene el siguiente sistema de control PI autosintonizado:

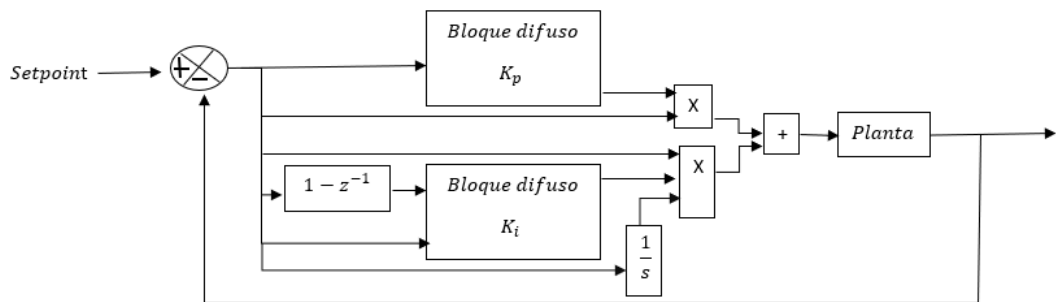


Gráfico 19. Sistema de control PI autosintonizado por lógica difusa.

Ponce (2010), plantea las siguientes funciones de membresía de los conjuntos difusos de la interfaz de difusificación, o también llamadas zonas de difusificación, para el bloque  $K_p$ :

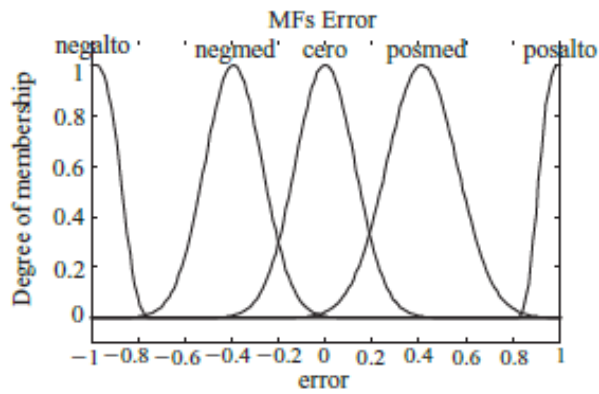


Gráfico 20. Funciones de membresía de la interfaz de difusificación.

Además, establece las siguientes funciones de membresía de los conjuntos difusos de la interfaz de desdifusificación, o también llamadas zonas de desdifusificación:

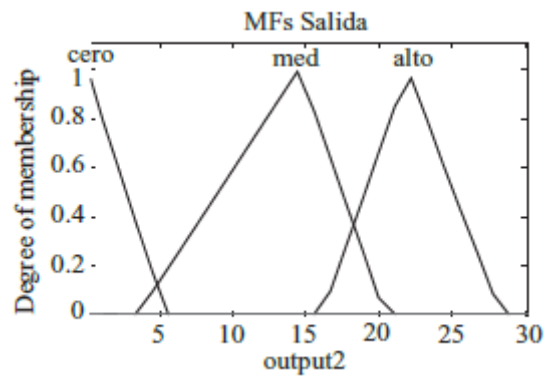


Gráfico 21. Funciones de membresía de la interfaz de desdifusificación.

Las reglas que rigen la lógica de decisiones son las siguientes:

- Si error es NegAlto entonces la salida es Alto.
- Si error es Cero entonces la salida es Cero.
- Si error es PosAlto entonces la salida es Alto.
- Si error es NegMed entonces la salida es Med.
- Si error es PosMed entonces la salida es Med.



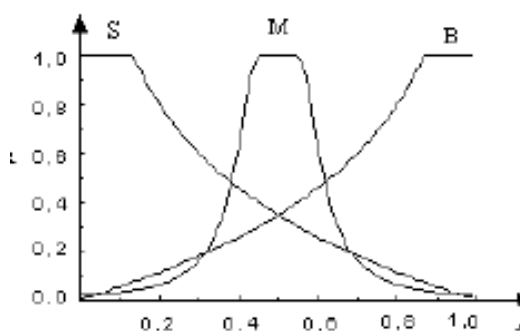
También se pueden expresar mediante la siguiente tabla de una entrada:

Error				
NegAlto	NegMed	Cero	PosMed	PosAlto
Alto	Med	Cero	Med	Alto

*Tabla 1. Tabla de reglas del sintonizador  $K_p$ .*

El rango de valores que puede tomar  $K_p$ , lo establece solo como positivo. Es lógico denotar que, gracias a las características del control proporcional de brindar velocidad de acercamiento al setpoint, ante errores grandes, la ganancia proporcional tenga que ser alta. Para errores en el rango medio, una ganancia media; y para errores en rango cero, tenga que ser cero.

Por otro lado, Almeida & Coelho (2002), establecen que el bloque difuso de la ganancia integrativa precisa de dos entradas, el cambio del error y el error mismo, y poseen el mismo número de conjuntos difusos de forma triangular, de la siguiente manera:



*Gráfico 22. Funciones de pertenencia de difusificación del autosintonizador  $K_i$ .*

Establece el siguiente conjunto de zonas de desdifusificación para la ganancia integrativa:

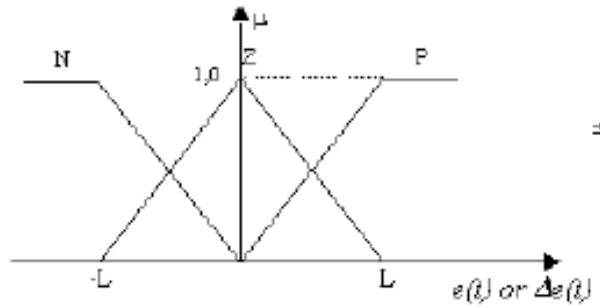


Gráfico 23. Funciones de pertenencia de la desdifusificación del autosintonizador  $K_i$ .

A partir del sistema de autosintonización por ganancia de fase que plantea tal trabajo de investigación, se puede denotar las reglas que rigen la autosintonización de la ganancia integrativa, expresadas en la siguiente tabla de doble entrada:

		$\Delta\text{Error}$		
		N	Z	P
Error	N	B	M	B
	Z	S	S	S
	P	B	M	B

Tabla 2. Tabla de reglas del autosintonizador  $K_i$ .

Es importante denotar que Almeida & Coelho (2002), afirman que los rangos de desdifusificación vienen limitados por la estabilidad del sistema, y solo son positivos. Según la teoría mostrada, las funciones de membresía no lineales se pueden aproximar a triangulares, con el objetivo de mejorar la computarización. Además, es clásico considerar que los rangos de difusificación ejercen limitantes de las triangulares en 1 y -1, esto es bastante común en los antecedentes expuestos, para entradas de cambio de error y el error mismo.

b) Autosintonización difusa orientada al control de velocidad de un robot diferencial.

Entiéndase que todo el sistema de control de velocidad del robot diferencial es un sistema MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas). En el caso particular de la presente tesis, el robot cuenta con cuatro

motores conectados a trenes de rodaje. De manera que son cuatro velocidades que controlar, y se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Son cuatro controles de velocidad y cada uno con sus ganancias a sintonizar. De manera que, se debe simplificar lo máximo posible el procesamiento, con el objetivo de tener un tiempo de muestreo aceptable para el elemento digital, en el presente caso, un microcontrolador.
- Los motores no son físicamente iguales, consecuentemente, en su etapa transitoria, el robot puede llegar a experimentar una diferencia de velocidades por parte de los motores que posee en un lado; respecto a los que posee en el otro. También, si el robot es expuesto a terrenos irregulares con relieves, entonces se suscitan perturbaciones en la etapa estacionaria, las cuales se ven remediadas por la propiedad de adaptación del autosintonizador; sin embargo, durante este proceso, la diferencia de velocidades se puede hacer notable. Tal diferencia, ocasiona cambios en la trayectoria del robot, lo cual es indeseable.

Para estas dos problemáticas se debe tener en cuenta las soluciones siguientes:

- El procesamiento puede verse simplificado con el uso de funciones de membresía triangulares, puesto que son lineales y simétricas, otorgan facilidad de cálculo con un aproximado cercano a funciones exponenciales o cuadráticas. Es menester la omisión del derivativo, puesto que produce una respuesta impulso al inicio, la cual puede modificar la dirección inicial del robot, su lógica difusa de sintonización consume memoria, y la respuesta de los motores no suele ser muy rápida; por ende, no es necesario. Además, el uso de una entrada en la base de reglas de la sintonización integrativa que toma en cuenta el cambio del error, puede llegar a suplir las labores de un derivativo. Es importante dar a conocer que, la desdifusificación por método del centroide aproximando por contracción y superposición, resume la computarización.

- En el caso de los motores, la ganancia proporcional es la más prominente y rige el crecimiento de la respuesta del sistema junto con su acercamiento al setpoint, en consecuencia, a sus reglas de sintonización se le debe sumar dos entradas más, una de ellas es la diferencia de velocidades de un lado con respecto al otro, y la otra es el cambio del error. La diferencia de velocidades debe regir los valores de las constantes proporcionales, las cuales son las más influyentes en la acción de control de un motor con respecto a su opuesto. De manera que, para la velocidad menor se le asigne una acción de control mayor a la relativa al motor con velocidad mayor, consecuentemente, el robot puede corregir la desviación previa. La inclusión del cambio del error es necesaria, puesto que en el control PI discreto, la constante proporcional esta en producto con este cambio, de manera que la acción de control que actúa en la planta también es influenciada por este factor.

Para ilustrar las soluciones dadas, se propone el siguiente sistema de control PI discreto autosintonizado por lógica difusa, para un motor del robot:

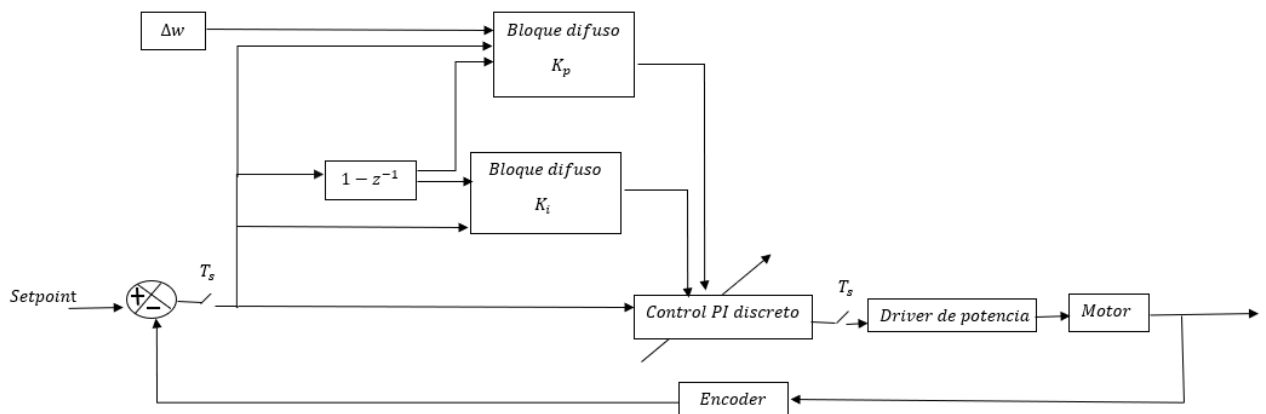


Gráfico 24. Sistema de control PI discreto autosintonizado por lógica difusa de un motor.

Tenemos para el bloque difuso de sintonización  $K_p$ , las siguientes zonas de difusificación de sus tres entradas:

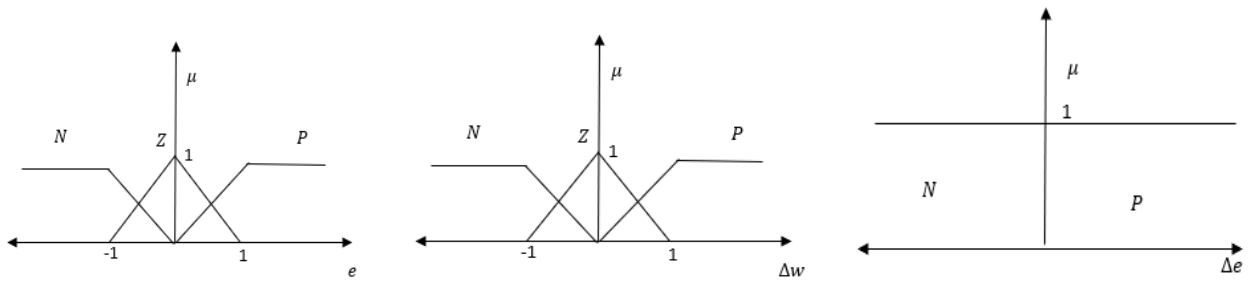


Gráfico 25. Zonas de difusificación de tres entradas.

Consideremos la ecuación del control PI discreto:

$$PI(n) = PI(n - 1) + \{E(n) - E(n - 1)\}(K_p) + E(n - 1)(K_i T_s) \dots (40)$$

Entiéndase que es la acción de control PI, la que actúa directamente en la planta, mas no la constante proporcional, en caso de una diferencia de velocidades entre los dos motores paralelos, es menester aumentar la acción de control en el motor con la menor velocidad; y disminuirla, en el motor con la mayor, con el objetivo de evitar o corregir la desviación indeseada y compensar la diferencia. Tal como se puede observar en la ecuación, la constante proporcional es la prominente en la magnitud de la acción proporcional, a comparación de la ganancia integrativa, la cual, está multiplicándose con el tiempo de muestreo del orden de los milisegundos. Surge la tentación de aumentar la constante  $K_p$  en un motor y disminuirla en el otro. Sin embargo, obsérvese la siguiente curva de respuesta:

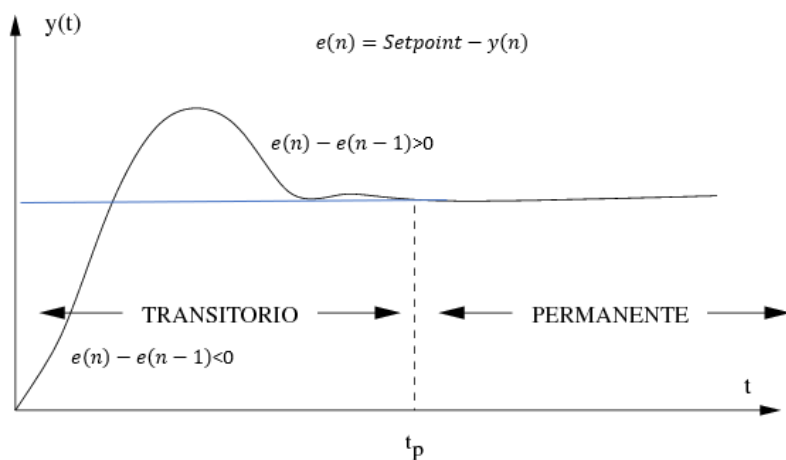


Gráfico 26. Curva de respuesta del motor.

En la región transitoria inicial de crecimiento, el cambio de error es negativo, puesto que esta en producto con la constante  $K_p$ , entonces querer aumentar esta constante con el objetivo de aumentar la velocidad del motor es inadecuado, puesto que se ocasionará lo inverso. Obsérvese la ecuación del control PI discreto, al aumentarse  $K_p$ , se estaría aumentando la magnitud a sustraerse de la acción de control. Caso contrario ocurre, cuando disminuimos  $K_p$  en la región transitoria, disminuimos el sustraendo y la acción de control tiende a mantenerse. Consecuentemente, lo único que se consigue es aumentar la diferencia de velocidades. Es por ello que, es necesario obtener la valoración positiva o negativa del cambio del error. En caso sea positiva, es válido aumentar  $K_p$  en el motor con menor velocidad y disminuirla en el motor con mayor velocidad, tal premisa se presenta cuando la respuesta de la planta está en decrecimiento. Tomando en consideración lo explicado, se modifican las reglas de lógica difusa expuestas para la sintonización de la ganancia proporcional:

		$\Delta error > 0$		
		error(n)		
		N	Z	P
$\Delta w$	N	B	B	B
	Z	B	S	B
	P	S	S	S

Tabla 3. Reglas de autosintonizador  $K_p$  del robot diferencial.

		$\Delta error < 0$		
		error(n)		
		N	Z	P
$\Delta w$	N	S	S	S
	Z	B	S	B
	P	B	B	B

Tabla 4. Reglas de autosintonizador  $K_p$  del robot diferencial.

Donde:

$$\Delta w = w_{motor\ actual} - w_{motor\ opuesto} \dots (41)$$

Se denota que cada autosintonizador del motor evalúa si es que esta en desventaja o ventaja con respecto a su opuesto, tomando en cuenta que

son dos pares de motores paralelo. Teniendo en consideración las siguientes zonas de desdifusificación:

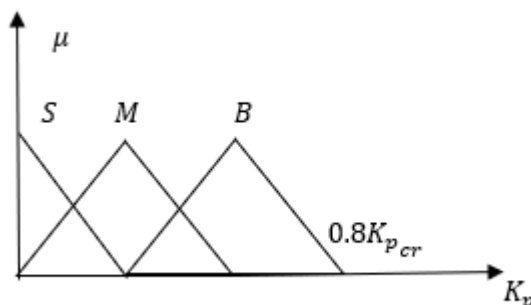


Gráfico 27. Zonas de desdifusificación del autosintonizador  $K_p$  del robot diferencial.

Donde S, M y B, significan small, medium y big, respectivamente. Se establece como límite máximo al 80% de la constante proporcional crítica, para la cual la planta se hace oscilatoria. Además, se hace una división igualitaria en cuanto a los espacios de cada zona y sus máximos. Obsérvese que, cuando la diferencia de velocidades cae muy cercano a Z, las reglas categorizan membrecías expuestas por Ponce (2010); sin embargo, en caso de una diferencia mayor, se prioriza la erradicación de la diferencia de velocidades. Para que el resultado sea notable en la planta, se toma una distancia de una zona entre el  $K_p$  que recibirá el motor con menor velocidad; y del que recibirá, el de mayor velocidad. Para cuando la diferencia de velocidades sea cercana a cero, y el error sea grande, ya sea negativo o positivo, es necesario aumentar a B, la constante proporcional, para acelerar al sistema, pero cuando el error se acerca a cero se disminuye, para reducir sobrepasos.

El desempeño del control de velocidad del robot y su corrección de desviación puede llegar a ser impreciso y rápido, gracias a la presencia de pocas zonas de desdifusificación y difusificación. Es necesario la experimentación, con diferente número de zonas difusificación-desdifusificación, los principales números, según Brío (2006), son 3, 5 y 7. Además, es menester asumir que el número de zonas de difusificación y desdifusificación tiene que ser el mismo, esto con el objetivo de lograr versatilidad y precisión al momento de deducir reglas para más zonas, basándose en las reglas expuestas por Ponce (2010) y que Almeida & Coelho (2002).

Tenemos en el caso de la autosintonización de la ganancia integrativa, las siguientes zonas de difusificación para las dos entradas:

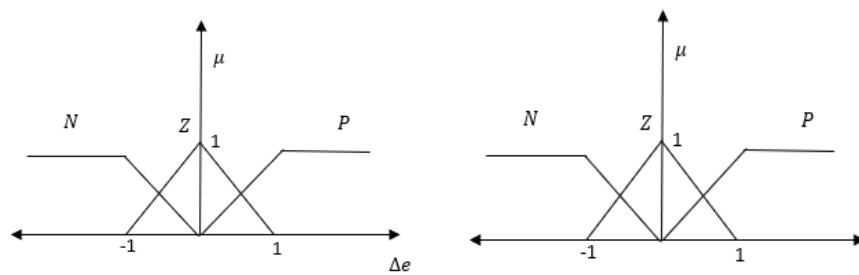


Gráfico 28. Zonas de difusificación del autosintonizador  $K_i$  del robot diferencial.

Las zonas de desdifusificación serían:

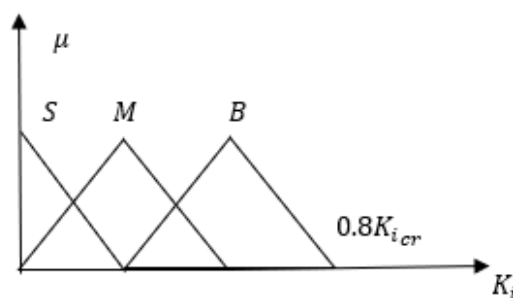


Gráfico 29. Zonas de desdifusificación del autosintonizador  $K_i$  del robot diferencial.

Las reglas resultan ser las mismas, que las expuestas por Almeida & Coelho (2002):

		ΔError		
		N	Z	P
Error	N	B	M	B
	Z	S	S	S
	P	B	M	B

Tabla 5. Reglas del autosintonizador  $K_i$  del robot diferencial.

Las reglas establecen que se debe acelerar la acción integral cuando el error y su cambio sean grandes; sin embargo, cuando el error tiende a ser cero es necesario atenuar la constante integrativa de forma que la acción de control se vuelva lenta, mejorando exactitud y estabilidad. En



el caso que, solo el cambio del error se reduzca a casi cero, es menester un rango medio.

Puesto que son solo tres zonas tanto en la difusificación, como en la desdifusificación, entonces las acciones de control pueden suponer cambios rápidos; sin embargo, puede perder precisión. Para ello, es necesario, poner a prueba sistemas difusos de autosintonización con más zonas de difusas.

### 2.2.8. Método del centroide

Existen distintos métodos para lograr obtener las salidas de la interfaz de desdifusificación, a partir de las funciones de membresía y los grados de pertenencia de las zonas de desdifusificación. El más efectivo y aproximado es el método por centroide, el cual, consiste en cortar la función de membresía en su grado de pertenencia y sacar el centroide del área inferior. Tenemos un ejemplo del recorte de la siguiente forma:

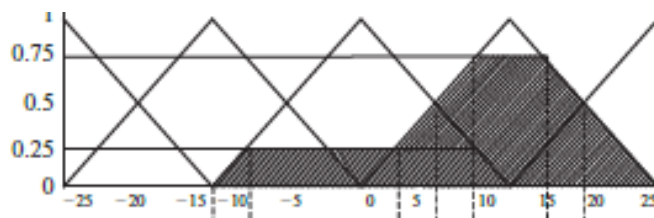


Gráfico 30. Recorte de zonas de desdifusificación en sus grados de pertenencia.

Sea los límites totales de la función recortada (a, b):

$$Salida = \frac{\int_a^b \mu(x)xdx}{\int_a^b \mu(x)dx} \dots (42)$$

Si tenemos una función compuesta de la siguiente forma:

$$h(x) = f(x) + g(x) \dots (43)$$

Tal que  $f(x)$  solo existe en (a, b) y  $g(x)$  en (b, c), entonces el centroide será:

$$y_{ct} = \frac{\int_a^c h(x)xdx}{\int_a^c h(x)dx} = \frac{\int_a^b f(x)xdx + \int_b^c g(x)xdx}{\int_a^b f(x)dx + \int_b^c g(x)dx} \dots (44)$$

Tenemos que el centroide de  $f(x)$  y  $h(x)$ , son:

$$y_f = \frac{\int_a^b f(x)xdx}{\int_a^b f(x)dx} \dots (45)$$

$$y_g = \frac{\int_b^c g(x)xdx}{\int_b^c g(x)dx} \dots (46)$$

Entonces:

$$\int_a^b f(x)xdx = y_f \int_a^b f(x)dx \dots (47)$$

$$\int_b^c g(x)xdx = y_g \int_b^c g(x)dx \dots (48)$$

Podríamos reformular el centroide general de la siguiente forma:

$$y_{ct} = \frac{y_f A_f + y_g A_g}{A_f + A_g} \dots (49)$$

Donde  $A_f$  y  $A_g$ , son las áreas de las funciones en sus respectivos rangos:

$$A_f = \int_a^b f(x)dx \dots (50)$$

$$A_g = \int_b^c g(x)dx \dots (51)$$

Gracias a la última expresión del centroide, podemos simplificar el cálculo, con el solo reemplazo de los centroides y áreas de las funciones compuestas, siempre y cuando, ya se conozcan.

Chavéz & Chavéz (2021), en su tesis, hacen una aproximación aceptable del centroide de la función compuesta, bajo dos premisas, la contracción de cada función de pertenencia a su grado de pertenencia, y la superposición de áreas, independientemente si sus límites se cruzan. Estas dos medidas se compensan entre sí, y se aplican manteniendo el uso de la última expresión matemática del centroide encontrada.

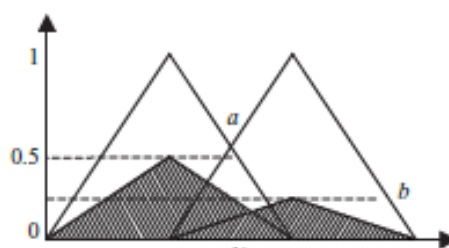


Gráfico 31. Contracción y superposición.

Esta síntesis se hace con el objetivo de simplificar el procesamiento y cálculo ejercido por algún microcontrolador, al cual se le implemente la lógica difusa.

## 2.3. Marco conceptual

### 2.3.1. Sistema de control automático

Es un conjunto de elementos interconectados y organizados entre sí, con el objetivo de ejercer control sobre la salida de un sistema físico, no requiere la intervención humana, pero sí de retroalimentación negativa. En esencia, trata de igualar la salida del sistema físico a una entrada de referencia. Está conformado básicamente por una planta, controlador, un sensor y un restador.

#### a) Planta

Es cualquier sistema físico para controlar.

#### b) Controlador

Es el elemento encargado de ejercer las acciones de control sobre la planta a partir de su entrada que es el error.

#### c) Error

Es la diferencia entre la entrada de referencia (setpoint) y la salida de la planta.

#### d) Sensor

Se encarga de detectar la salida de la planta y convertirla a dimensiones adecuadas para ser restada a la entrada de referencia.

#### e) Retroalimentación negativa

Acción que extrae una porción de la salida del sistema y lo resta a la entrada de referencia, con el objetivo de ejercer un mayor control.

#### f) Perturbación

Ruido o señales externas al sistema de control que se adhieren a las acciones de control del sistema o modifican la evolución de la planta.

### 2.3.2. Bloque de muestreo y retención

Es un sistema que convierte la señal muestreada en tiempos exactos discretos, en una señal continua que se aproxima a la señal aplicada al muestreador. Si es de orden cero, implica que el sistema retiene la amplitud de la muestra en un instante de muestreo al siguiente, su salida es una función escalonada y emula el comportamiento de un conversor análogo/digital antes de la cuantificación y codificación.

### 2.3.3. Características en el dominio del tiempo

#### a) Tiempo de retardo

Tiempo que tarda la respuesta en alcanzar por primera vez el 50% de su valor permanente, estacionario o final.

#### b) Tiempo de subida

Es el tiempo que transcurre desde que la respuesta pasa de un valor del 10% al 90% de su valor final.

#### c) Tiempo pico

Es el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar el primer pico o máximo de sobreimpulso o sobreelongación.

#### d) Porcentaje de sobrepaso máximo

Representa la mayor diferencia existente entre la respuesta en tiempo real y su entrada de referencia, expresado en manera porcentual con respecto a su setpoint.

#### e) Tiempo de asentamiento

Es el tiempo que tarda la curva de respuesta en alcanzar y mantenerse dentro de una determinada banda respecto del valor final en un 5%.

#### f) Error estacionario

Es la diferencia entre el valor de referencia y el valor de estado estacionario.

#### g) Error estacionario promedio

Es el promedio del error estacionario, después del tiempo de asentamiento. Es una métrica del error, aplicable a todo el recorrido del robot móvil.

#### 2.3.4. Tracción

Es un mecanismo que permite transmitir la fuerza del movimiento que realiza un motor, a las ruedas.

#### 2.3.5. Velocidad de desviación promedio

Es la velocidad angular promedio de desviación del robot móvil diferencial, en radianes por segundo, y es obtenido de la diferencia de velocidades promedio de los dos lados del robot, dividido entre su distancia intermedia. Puede interpretarse como la velocidad de giro de todo el robot móvil con respecto a un punto de referencia externo, durante todo su recorrido.

#### 2.3.6. Principales números de zonas de difusificación-desdifusificación

Los principales números de zonas de difusificación-desdifusificación que se emplean en el diseño de controladores difusos, según Brío (2006) y Ponce (2010), son 3, 5 y 7 zonas.

### 2.4. Sistema de hipótesis

#### 2.4.1. Hipótesis

Los controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa e implementados con los principales números de zonas de difusificación-desdifusificación para un robot diferencial tipo oruga y con desplazamiento en un terreno agrícola de la región La Libertad, en relación a todas las velocidades, poseen las mismas características en el dominio del tiempo las cuales son: tiempo de retardo de 0.31 s , tiempo de subida de 0.783 s, un tiempo pico de 2.45 s, porcentaje de sobrepaso máximo de 5.43%, tiempo de asentamiento de 2.35 s y un error estacionario de 0 cm/s. Además, poseen una velocidad de desviación promedio igual a 0 rad/s.

#### 2.4.2. Variables. Operacionalización de variables.

##### a) Variable independiente

Controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa con los principales números de zonas de difusificación-desdifusificación.

##### b) Variable dependiente

Características en el dominio del tiempo y velocidad de desviación promedio, para diferentes velocidades.

Variable independiente	Definición conceptual	Indicadores	Unidades	Instrumento de investigación
Controles de velocidad autosintonizados por lógica difusa	Controlador cuyas ganancias proporcional e integrativa van a ser sintonizadas por sí mismo, usando lógica difusa	Número de zonas de difusificación.	Cantidad	Hoja de diseño
		Número de zonas de desdifusificación.	Cantidad	Hoja de diseño
		Rango de estabilidad de ganancia proporcional.	Cantidad	Por experiencia. Por prueba y error.
		Rango de estabilidad de ganancia integrativa.	Cantidad	Por experiencia. Por prueba y error.

Tabla 6. Variable independiente.

Variabes dependientes	Definición conceptual	Indicadores	Unidades	Instrumento de investigación
Características en el dominio del tiempo	Parámetros de medición temporal a partir la curva de respuesta de la planta.	Tiempo de retardo	Segundos	Node-Red, Matlab y Excel.
		Tiempo de subida	Segundos	Node-Red, Matlab y Excel.
		Tiempo pico	Segundos	Node-Red, Matlab y Excel.
		Tiempo de asentamiento	Segundos	Node-Red, Matlab y Excel.
		Porcentaje de sobrepaso máximo	Porcentual	Node-Red, Matlab y Excel.
		Error estacionario promedio	Centímetros por segundo	Node-Red, Matlab y Excel.
Velocidad de desviación promedio	Diferencia de velocidades promedio entre las ruedas del robot diferencial, que produce desviaciones respecto a la trayectoria rectilínea.	Diferencia de velocidades promedio	Centímetros por segundo	Node-Red, Matlab y Excel.

Tabla 7. Variables dependientes.

### III. METODOLOGÍA EMPLEADA

#### 3.1. Tipo y nivel de investigación

##### 3.1.1. Tipo de investigación:

###### a) De acuerdo a la orientación y finalidad:

- Exploratoria

###### b) De acuerdo a la técnica de contrastación:

- Experimental.

##### 3.1.2. Nivel de investigación:

- Nivel aplicativo

#### 3.2. Población y muestra de estudio

##### 3.2.1. Población

- Velocidades para los motores entre 0 a 100RPM.
- Sistemas difusos de autosintonización basados en n zonas de difusificación-desdifusificación

##### 3.2.2. Muestra

###### a) Velocidades para los motores:

- 60 RPM, 70 RPM, 80 RPM y 90 RPM.

###### b) Sistemas difusos de autosintonización con:

- 3 zonas de difusificación-desdifusificación.
- 5 zonas de difusificación-desdifusificación.
- 7 zonas de difusificación-desdifusificación.

#### 3.3. Diseño de investigación

##### 3.3.1. Diseño de sistemas difusos

Debido a que la problemática propone la comparación de rendimiento de diferentes sistemas difusos de autosintonización basados en los principales números de zonas difusificación-desdifusificación, entonces es necesario proponer las zonas, junto con las reglas deducidas a partir de los antecedentes que se enmarcan para 3 zonas; y tomando en consideración a la influencia, entre sí, de los motores del robot diferencial. Se propone los siguientes sistemas difusos, reglas y fórmulas de desdifusificación. En el caso de la ganancia proporcional, siempre se

considerará una constante, la evaluación de solo dos zonas del cambio del error, ya que solo supone su inspección como positivo o negativo. Con el objetivo de lograr una correcta orientación de la autosintonización para las correcciones requeridas, y el cambio que suponga a las reglas, solo se dará en una inversión vertical simétrica de estas, con respecto a la entrada de la diferencia de velocidades.

- a) Tres zonas de difusificación-desdifusificación.
- Para la ganancia proporcional

Se tiene las siguientes zonas de difusificación:

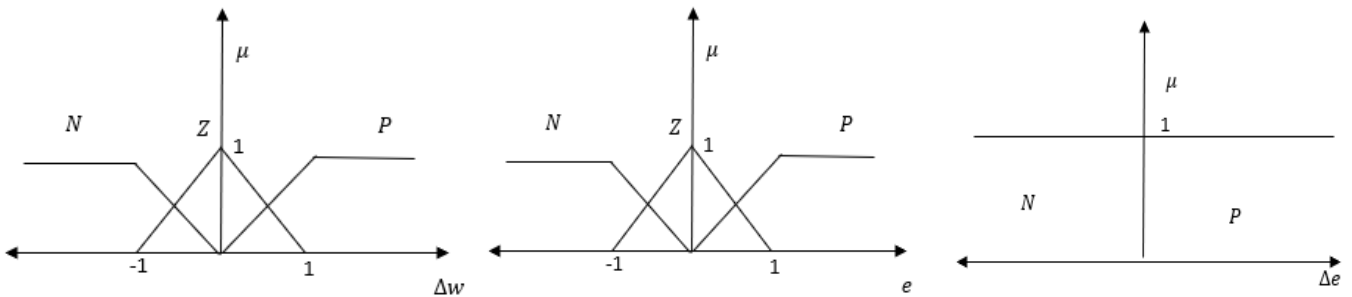


Gráfico 32. Sistema de 3 zonas de difusificación para  $K_p$ .

Junto con las siguientes zonas de desdifusificación:

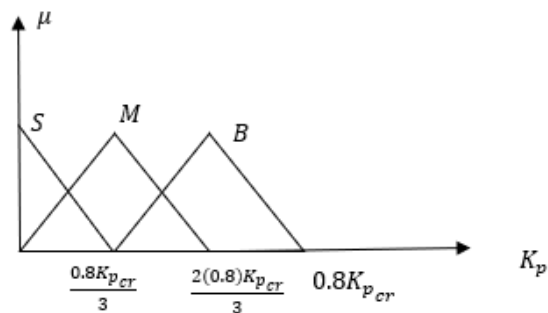


Gráfico 33. Sistema de 3 zonas de desdifusificación para  $K_p$ .



Se toman en cuenta las siguientes reglas:

		Δerror>0		
		error(n)		
		N	Z	P
Δw	N	B	B	B
	Z	B	S	B
	P	S	S	S

Tabla 8. Reglas de autosintonización difusa de 3 zonas para Kp.

		Δerror<0		
		error(n)		
		N	Z	P
Δw	N	S	S	S
	Z	B	S	B
	P	B	B	B

Tabla 9. Reglas de autosintonización difusa de 3 zonas para Kp.

Usando el método del centroide con sus aproximaciones, podemos formular la desdifusificación en función a los grados de pertenencia de cada función de membresía:

$$K_{p_{resultante}} = \frac{\mu_S + 6\mu_M + 12\mu_B}{3\mu_S + 6\mu_M + 6\mu_B} \left( \frac{0.8K_{p_{cr}}}{3} \right) \dots (52)$$

- Para la ganancia integrativa:

Se tiene las siguientes zonas de difusificación:

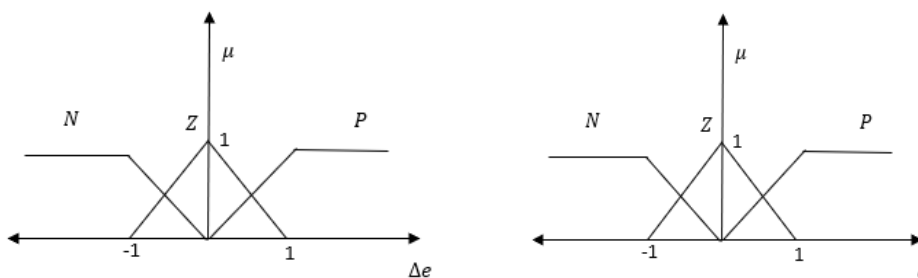


Gráfico 34. Sistema de 3 zonas de difusificación para Ki.

Se tiene las siguientes zonas de desdifusificación:

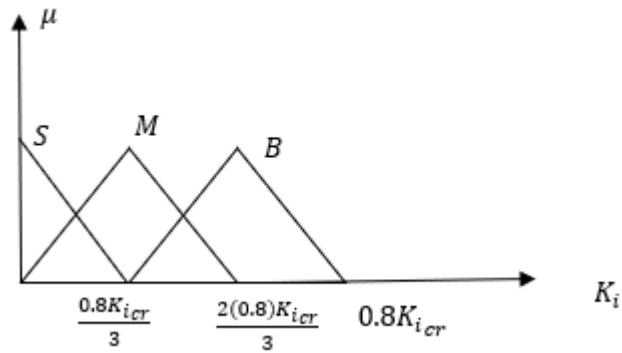


Gráfico 35. Sistema de 3 zonas de desdifusificación para  $K_i$ .

Se toman en cuenta las siguientes reglas:

		ΔError		
		N	Z	P
Error	N	B	M	B
	Z	S	S	S
	P	B	M	B

Tabla 10. Reglas de autosintonización difusa de 3 zonas para  $K_i$ .

Se calcula por el método del centroide, la constante  $K_i$ :

$$K_{i_{resultante}} = \frac{\mu_S + 6\mu_M + 12\mu_B}{3\mu_S + 6\mu_M + 6\mu_B} \left( \frac{0.8K_{i_{cr}}}{3} \right) \dots (53)$$

b) Cinco zonas de difusificación-desdifusificación.

- Para la ganancia proporcional:

Se tiene las siguientes zonas de difusificación:

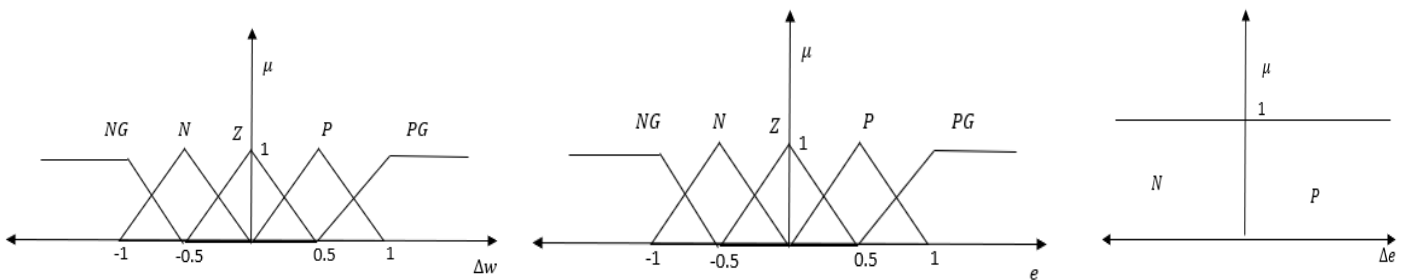


Gráfico 36. Sistema de 5 zonas de difusificación para  $K_p$ .

Se tiene las siguientes zonas de desdifusificación:

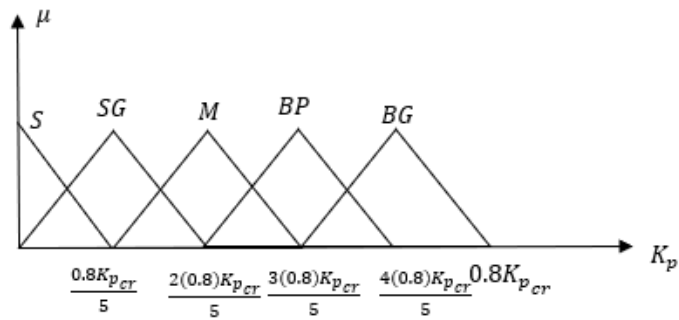


Gráfico 37. Sistema de 5 zonas de desdifusificación para  $K_p$ .

Se tiene las siguientes reglas:

		$\Delta error > 0$				
		error				
		NG	N	Z	P	PG
$\Delta w$	NG	BG	BG	BG	BG	BG
	N	BP	BP	BP	BP	BP
	Z	BP	BP	S	BP	BP
	P	SG	SG	SG	SG	SG
	PG	S	S	S	S	S
		$\Delta error < 0$				
		error				
		NG	N	Z	P	PG
$\Delta w$	NG	S	S	S	S	S
	N	SG	SG	SG	SG	SG
	Z	BP	BP	S	BP	BP
	P	BP	BP	BP	BP	BP
	PG	BG	BG	BG	BG	BG

Tabla 11. Reglas de autosintonización difusa de 5 zonas para  $K_p$ .

Se calcula por el método del centroide, la constante  $K_p$ , en función a sus grados de pertenencia:

$$K_{p_{resultante}} = \frac{\mu_S + 6\mu_{SG} + 12\mu_M + 18\mu_{BP} + 24\mu_{BG}}{3\mu_S + 6\mu_{SG} + 6\mu_M + 6\mu_{BP} + 6\mu_{BG}} \left( \frac{0.8K_{p_{cr}}}{5} \right) \dots (54)$$

- Para la ganancia integrativa:  
Se tiene las siguientes zonas de difusificación:

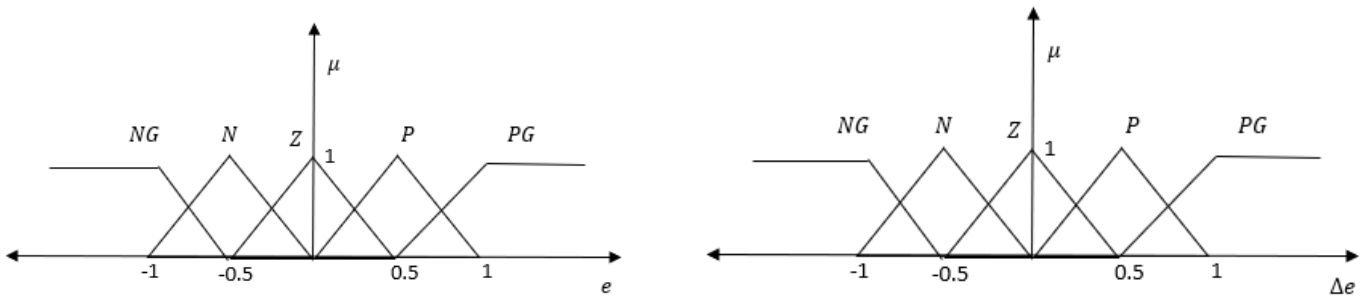


Gráfico 38. Sistema de 5 zonas de difusificación para  $K_i$ .

Se tiene las siguientes zonas de desdifusificación:

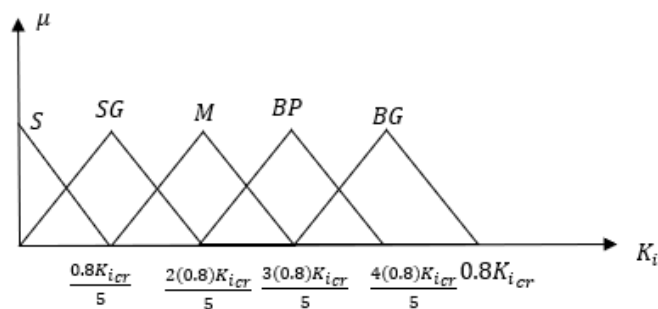


Gráfico 39. Sistema de 5 zonas de desdifusificación para  $K_i$ .

Se tiene las siguientes reglas:

		Δerror				
		NG	N	Z	P	PG
error	NG	BG	BP	M	BP	BG
	N	BP	BP	M	BP	BP
	Z	S	S	S	S	S
	P	BP	BP	M	BP	BP
	PG	BG	BP	M	BP	BG

Tabla 12. Reglas de autosintonización difusa de 5 zonas para  $K_i$ .

Se calcula por el método del centroide, la constante  $K_i$ , en función a sus grados de pertenencia:

$$K_{i\text{resultante}} = \frac{\mu_S + 6\mu_{SG} + 12\mu_M + 18\mu_{BP} + 24\mu_{BG}}{3\mu_S + 6\mu_{SG} + 6\mu_M + 6\mu_{BP} + 6\mu_{BG}} \left( \frac{0.8K_{i\text{cr}}}{5} \right) \dots (55)$$

c) Siete zonas de difusificación-desdifusificación.

- Para la ganancia proporcional

Se tiene las siguientes zonas de difusificación:

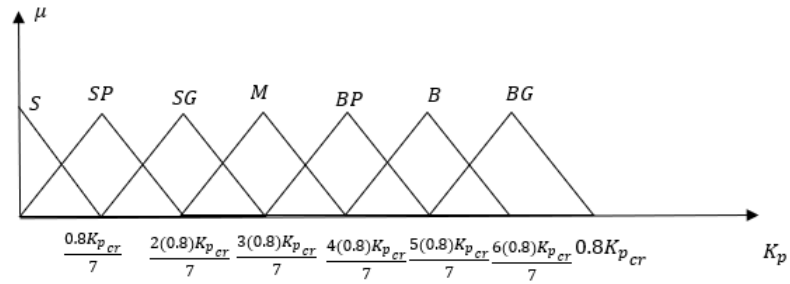


Gráfico 40. Sistema de 7 zonas de difusificación para  $K_p$ .

Se tiene las siguientes zonas de desdifusificación:

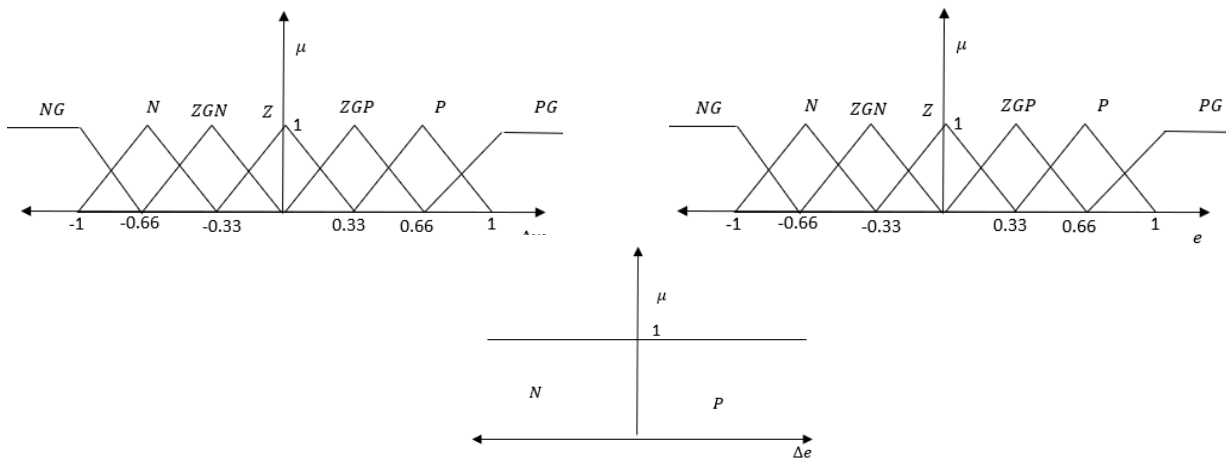


Gráfico 41. Sistema de 7 zonas de desdifusificación para  $K_p$ .

Tenemos las siguientes reglas:

		$\Delta error < 0$						
		error						
		NG	N	ZGN	Z	ZGP	P	PG
$\Delta w$	NG	S	S	S	S	S	S	S
	N	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
	ZGN	SG	SG	SG	SG	SG	SG	SG
	Z	BP	BP	BP	S	BP	BP	BP
	ZGP	BP	BP	BP	BP	BP	BP	BP
	P	B	B	B	B	B	B	B
	PG	BG	BG	BG	BG	BG	BG	BG

Tabla 13. Reglas de autosintonización difusa de 7 zonas para  $K_p$ .

		$\Delta error > 0$						
		error						
		NG	N	ZGN	Z	ZGP	P	PG
$\Delta w$	NG	BG	BG	BG	BG	BG	BG	BG
	N	B	B	B	B	B	B	B
	ZGN	BP	BP	BP	BP	BP	BP	BP
	Z	BP	BP	BP	S	BP	BP	BP
	ZGP	SG	SG	SG	SG	SG	SG	SG
	P	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
	PG	S	S	S	S	S	S	S

Tabla 14. Reglas de autosintonización difusa de 7 zonas para  $K_p$ .

Se calcula por el método del centroide, la constante  $K_p$ , en función a sus grados de pertenencia:

$$K_{p_{resultante}} = \frac{\mu_S + 6\mu_{SP} + 12\mu_{SG} + 18\mu_M + 24\mu_{BP} + 30\mu_B + 36\mu_{BG}}{3\mu_S + 6\mu_{SP} + 6\mu_{SG} + 6\mu_M + 6\mu_{BP} + 6\mu_B + 6\mu_{BG}} \left( \frac{0.8K_{p_{cr}}}{7} \right) \dots (56)$$

- Para la ganancia integrativa:

Se tiene las siguientes zonas de difusificación:

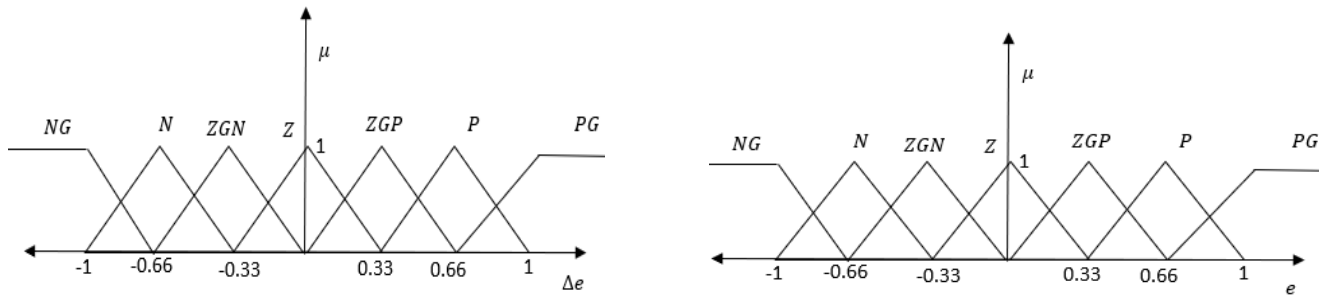


Gráfico 42. Sistema de 7 zonas de difusificación para  $K_i$ .

Se tiene las siguientes zonas de desdifusificación:

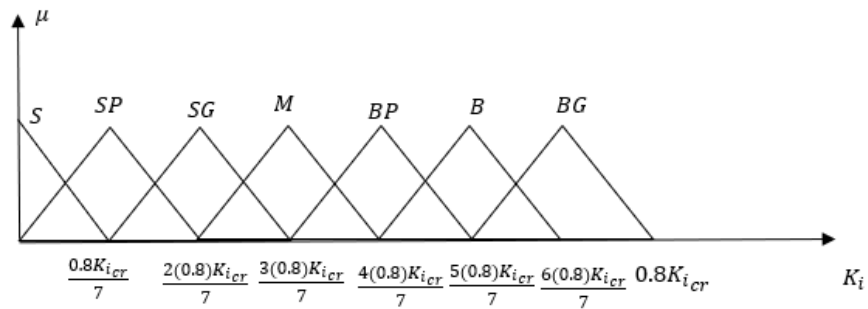


Gráfico 43. Sistema de 7 zonas de desdifusificación para  $K_i$ .

Se tiene las siguientes reglas:

		Δerror						
		NG	N	ZGN	Z	ZGP	P	PG
error	NG	BG	B	BP	M	BP	B	BG
	N	B	B	BP	M	BP	B	BG
	ZGN	BP	BP	BP	M	BP	BP	BP
	Z	S	S	S	S	S	S	S
	ZGP	BP	BP	BP	M	BP	BP	BP
	P	B	B	BP	M	BP	B	B
	PG	BG	B	BP	M	BP	B	BG

Tabla 15. Reglas de autosintonización difusa de 7 zonas para  $K_i$ .

Se calcula por el método del centroide, la constante  $K_i$ , en función a sus grados de pertenencia:

$$K_{i\text{resultante}} = \frac{\mu_S + 6\mu_{SP} + 12\mu_{SG} + 18\mu_M + 24\mu_{BP} + 30\mu_B + 36\mu_{BG}}{3\mu_S + 6\mu_{SP} + 6\mu_{SG} + 6\mu_M + 6\mu_{BP} + 6\mu_B + 6\mu_{BG}} \left( \frac{0.8K_{i\text{cr}}}{7} \right) \dots (57)$$

#### d) Justificación de reglas

Es importante mencionar que, los grados de pertenencia de la interfaz de difusificación deben hallarse a partir de las funciones triangulares, simplemente efectuando un reemplazo de la variable independiente o entrada, en las ecuaciones que describen las rectas, lo cual no debe ser un reto. Para hallar el grado de pertenencia de la función de desdifusificación, se aplica el principio de extensión.

Las reglas deducidas para 5 y 7 zonas de difusificación-desdifusificación de la sintonización de la ganancia integrativa, están basadas en las reglas dadas por la bibliografía; y expuestas, en el sistema de 3 zonas. Se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para cuando la entrada de error se clasifica en un rango cercano a cero, la desdifusificación ira a la mínima zona, sin importar la zona del cambio del error. Cuando el cambio del error se ubica en el mínimo, la desdifusificación ira en la región intermedia, M, para todos los errores, exceptuando cuando este se ubique en el rango mínimo.
- Para todas las combinaciones de las dos interfaces, en el que las dos zonas estén en rangos mayores al mínimo de manera absoluta, independientemente si son positivas o negativas, les corresponderá una zona de desdifusificación superior a la intermedia M.
- Cada zona de cada interfaz tiene su similar en la interfaz de desdifusificación. Se hace referencia por similar, a la zona que esta en el mismo orden absoluto superior con respecto a la región intermedia M, en relación al que presenta la zona de difusificación con respecto a la zona intermedia Z, independientemente si es positiva o negativa.
- La combinación de dos entradas que tengan misma ubicación de zonas de difusificación, tendrá la misma zona de desdifusificación similar. En caso tal combinación tenga diferente ubicación de zonas de difusificación, se opta por escoger el similar de desdifusificación de la zona más cercana al origen.



Estas premisas rigen las reglas de los tres sistemas de sintonización, ya sea para 3, 5 y 7 zonas.

En caso de la sintonización de la ganancia proporcional, en base a la teoría expuesta, se brinda las siguientes consideraciones:

- Cuando el error esta en el rango mínimo junto con la diferencia de velocidades, la desdifusificación es mínima, es decir, S.
- Se prioriza la disminución de la diferencia velocidades ante el estado del error, exceptuando la primera consideración, esto es así, debido al hecho que cuando se alcanza el estado estacionario, lo cual ocurre en tiempos muy cercanos entre motores, el error es casi cero y la diferencia de velocidades tiende también a serlo. Consecuentemente, en la gran mayoría de casos, cuando la diferencia de velocidades es mayor al rango mínimo, el error también lo es.
- La asignación de desdifusificación es en relación a la magnitud de la diferencia de velocidades, conforme la diferencia de velocidades más se aleje del origen cero, la constante proporcional más grande será en un lado con respecto al otro, cubriendo todas las zonas de desdifusificación desde la más mínima hasta la máxima.
- Cuando la diferencia de velocidades es cercana a cero, pero el error no lo es, se escoge solo una zona superior a la intermedia para mejorar el acercamiento al setpoint, pero no demasiado, para no acrecentar las mínimas diferencias, y que la igualdad tienda a ser sostenible.

### 3.3.2. Interfaz Node-Red.

Se desarrolla una interfaz de Node- Red con el objetivo de conectar serialmente al microcontrolador del robot diferencial, con una interfaz gráfica que reciba los datos, los gráfique en tiempo real y los almacene en un bloc de notas.

El microcontrolador del robot diferencial se encarga de enviar, mediante un módulo Bluetooth, la velocidad de cada motor junto con las ganancias obtenidas por autosintonización difusa en cada iteración. En total, serían doce, tal como se muestra en la siguiente plantilla:

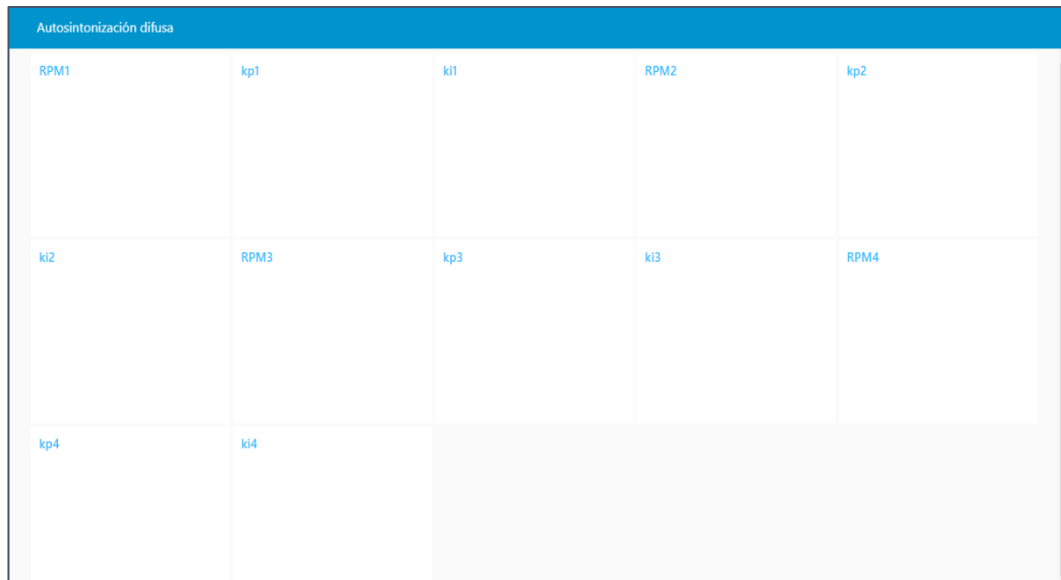


Gráfico 44. Plantilla de Node-Red para recepción de datos.

Para la recepción de los datos, debe tomarse en cuenta que el tiempo de interrupción sea mínimo y permita una correcta adquisición de datos. Además, se debe considerar que la interfaz sea capaz de almacenar el dato junto con el tiempo en que se recibe, tal tiempo debe estar categorizado en minutos, segundos y milisegundos, tal como se muestra en la siguiente programación:

```

1
2 var m=f.getMinutes();
3 var s=f.getSeconds();
4 var n = f.getMilliseconds();
5 msg.payload = m+' '+s+'.'+n+' '+ msg.payload;
6 msg.filename = 'C:\\nodejs\\RPM1+'.txt';
7 return msg;

```

Gráfico 45. Programación para recepción de datos y contabilización de tiempo en Node-Red.

### 3.3.3. Diseño de contrastación

$$G1 \rightarrow X \rightarrow O$$

$$G2 \rightarrow X \rightarrow O$$

Básicamente, G1 es el robot equipado con un determinado control de velocidad autosintonizado por un sistema difuso con un número de zonas de difusificación-desdifusificación, en total serán de 3, 5 y 7. Donde X, es el experimento en el terreno agrícola irregular. Además, G2 son las 4

diferentes velocidades para los motores del robot, de forma que se evalúa en el mismo experimento, desarrollado en el terreno irregular. También, O implica las observaciones, que en total serán 12. Se probarán las 4 diferentes velocidades para cada algoritmo de n zonas de difusificación-desdifusificación.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de investigación

Técnicas	Instrumentos
Observación gráfica	Interfaz gráfica de Node-Red y Matlab
Recolección de datos	Microcontrolador STM32, módulo Bluetooth, interfaz diseñada en Node-Red, herramienta de cálculo Matlab y Excel
Comparación de datos	Tablas de Excel.

*Tabla 16. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.*

Descripción de instrumentos:

- Interfaz gráfica de Node-Red: es una interfaz que va a realizar una gráfica en tiempo real, gracias a los datos recibidos por comunicación serial, y los va a almacenar en archivos de textos para ser exportados a Excel.
- Matlab es una herramienta de cálculo mediante el cual se va a obtener las características en el dominio del tiempo, además de poder graficar las variables en su evolución temporal.
- Excel: Herramienta para el almacenamiento de datos en tablas y para su comparación. También, sirve de puente para la exportación de los datos en los archivos de textos al análisis en Matlab.

### 3.5. Procesamiento y análisis de datos

#### a) Fase 1

Se evalúan los parámetros experimentales de la planta, tales como, el tiempo de respuesta de la planta y el mínimo tiempo de interrupción para el algoritmo y que sea aceptable para su recepción. Además, es importante encontrar los  $K_p$  y  $K_i$  críticos, para los cuales, la planta se vuelve oscilatoria. Siguiendo una metodología parecida a la de Ziegler-Nichols, primero hallamos el  $K_p$  crítico, y asegurando un límite aceptable del mismo con un 20% menos. Después, hallamos el  $K_i$  crítico. Entendamos que estos tienen que ser comunes para los cuatro motores del robot, con el fin de establecer igualdad de condiciones para las elecciones propuestas en los objetivos específicos, así que se escoge los mínimos de todos. Ya que provienen del mismo fabricante, los factores críticos tienden a ser los mismos.

#### b) Fase 2

Se implementan todos los algoritmos de control junto con su lógica difusa en el microcontrolador STM32, a modo de funciones, tomando en cuenta un mismo tiempo de interrupción global aceptable, salidas PWM, lecturas de encoders y comunicación serial. Además, se implementa la interfaz gráfica en Node-Red, la cual se encargará de recibir los datos por comunicación serial y guardarlos.

#### c) Fase 3

Se prueba el robot diferencial tipo oruga en un terreno agrícola, evaluando un desplazamiento de 4 metros. Este rango de recorrido es aceptable, puesto que Valencia et. al (2009), establece como mínimo un recorrido de robots móviles de 1 metro, con el objetivo de evaluar su control de velocidad. Se hacen en total 12 ensayos, los cuales corresponden a los tres sistemas difusos de autosintonización que toman en cuenta 3, 5 y 7 zonas de difusificación-desdifusificación, y para cada sistema, son 4 diferentes velocidades de motores, las cuales son 60 RPM, 70 RPM, 80 RPM y 90 RPM. Estas velocidades se escogieron puesto que van desde la media veloz hasta lo más notable que el robot puede movilizarse. Durante las pruebas, el microcontrolador estará

enviando las velocidades detectadas por los encoders, y las ganancias proporcional e integrativa, de manera que se podrá apreciar su evolución temporal, en la interfaz Node-Red. Este último agregará los segundos de recepción a los datos almacenados.

d) Fase 4

Los datos recibidos por Node-Red se organizan y se exportan a Excel, en este último, se filtran los datos defectuosos por errores de transmisión.

e) Fase 5

Los datos son exportados a Matlab, en forma de vectores y son analizados, con el fin de obtener las características en el dominio del tiempo y la velocidad de desviación promedio. Además, como parte de los resultados se considerará las gráficas obtenidas de los datos en Matlab, puesto que suele ser más exacto.

f) Fase 6

Se almacenan los resultados en tablas de Excel y las gráficas se organizan en el informe de tesis.

#### IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1. Consideraciones previas

En retribución a la Fase 1 del procesamiento y análisis de datos, se obtiene las siguientes ganancias mínimas críticas comunes correspondientes a los motores del robot diferencial.

	Acción proporcional Kp	Acción integrativa Ki
Ganancias críticas	1.25	5

Tabla 17. Ganancias críticas.

De forma que se obtiene los rangos fijos de desdifusificación para todas las interfaces:

$$0.8K_{p_{cr}} = 1 \dots (58)$$

$$0.8K_{i_{cr}} = 4 \dots (59)$$

En retribución a la Fase 2, se obtuvo que el mejor tiempo de muestreo, para el cual, la interfaz Node-Red, presenta una recepción aceptable es el siguiente:

$$t_{int} = 70 \text{ ms} \dots (60)$$

Por otro lado, es pertinente precisar el siguiente dimensionamiento del robot diferencial:

Radio de ruedas intermedias	Distancia intermedia entre motores
2.6 cm	20 cm

*Tabla 18. Dimensiones del robot diferencial.*

Además, para la obtención de las características en el dominio del tiempo, se consideró que la planta llegó al punto referencia, después del tiempo de asentamiento. Vale aclarar, que se aplicó el concepto estricto de tiempo de establecimiento como el límite temporal a partir del cual la planta entra en un valor dentro de la banda de 5%. Sin embargo, dado a las condiciones cambiantes a las cuales la planta es sometida, así como, los relieves y fricción del terreno agrícola, este establecimiento se sale fuera de manera repentina pero breve. Con este motivo, es propicio considerar un rango de mínimo de 10 muestras dentro de la banda de 5%, para establecer que la planta se encuentra en su estado estacionario, con el fin de obtener el error estacionario promedio y características temporales de transición. Se toma en consideración la siguiente ecuación para el error estacionario promedio:

$$ESS_{prom} = \frac{\sum_{i=0}^n |Setpoint - Respuesta_{motor}|}{n} \dots (61)$$

Donde n, se cuenta a partir del tiempo de establecimiento. Se considera el valor absoluto, puesto que no se intenta hacer suma entre un error de sobrepaso o de defecto, ya que esto confluiría en una compensación y se obtendría un parámetro engañoso.

Por el contrario, para la diferencia de velocidades promedio se considera la siguiente ecuación:

$$\Delta w_{prom} = \frac{\sum_{i=0}^n (RPM_{izquierdo} - RPM_{derecho})}{n} \dots (62)$$

Para el presente caso, si se considera todas las muestras de velocidades de los motores. Puesto que la compensación de  $K_p$ , para la abolición de desviación de trayectoria, debe ser efectiva en la transición. No se considera valor absoluto, puesto que la diferencia de velocidades se debe ir compensando de negativas a positivas o viceversa, con el motivo que, en promedio, el robot no se desvíe demasiado. Un resultado negativo, significaría una desviación hacia la izquierda, mientras que un positivo, una desviación a la derecha. Tal como se explicó, cada motor se balanceará con su paralelo, de manera que tendremos dos diferencias de velocidades promedio, una inferior y otra superior que influyen en la desviación total del robot. Para hallar la velocidad de desviación promedio de todo el robot diferencial con respecto al punto de referencia externo, de acuerdo a Corke (2011), tenemos la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{2\pi r_{rueda} (\Delta w_{prom_{superior}} + \Delta w_{prom_{inferior}})}{60(d_{intermedia})} \dots (63)$$

Donde el resultado se daría en radianes por segundo. Las dos diferencias de velocidades promedio, tienen como fin sumarse ya que influyen entre sí, para la desviación del robot.

Con el propósito de resumir la información en las tablas de resultados, se opta por las siguientes etiquetas para asumir la posición de los motores:

Motor izquierdo superior	Motor 1
Motor derecho superior	Motor 2
Motor derecho inferior	Motor 3
Motor izquierdo inferior	Motor 4

Tabla 19. Etiquetas de la posición de los motores.

Para evaluar la velocidad total del robot diferencial y sus características en el dominio del tiempo se considera el criterio de Corke (2011), aplicar un promedio de las velocidades de los dos lados del robot diferencial y puesto que posee dos ruedas en cada lado. Para el presente caso, el promedio se extiende a las 4 ruedas, puesto que la velocidad neta en un lado vendría a ser el promedio de las ruedas. También, la representación de la velocidad general del robot diferencial debe darse de forma lineal con unidades de centímetros por segundo, ya que es un dimensionamiento relativo al radio de las ruedas. Se muestra la ecuación de tal velocidad, de la siguiente forma:

$$V_{general} = \frac{2\pi(r_{rueda})(RPM_{izqinf} + RPM_{derinf} + RPM_{izsup} + RPM_{izinf})}{60(4)} \dots (64)$$

Tal velocidad lineal se evalúa en cada muestra, de forma que se obtiene la curva de respuesta para toda la velocidad lineal del robot en el tiempo, y permite evaluar sus propias características en el dominio temporal.

La notación usada para representar los resultados numéricos, posee los siguientes significados:



Notación	Significado
$T_p$	Tiempo pico
$T_{sub}$	Tiempo de subida
$T_s$	Tiempo de asentamiento
$ Ess\ prom $	Error estacionario promedio
$M_p \%$	Porcentaje de sobrepaso
$K_p\ prom$	Promedio $K_p$
$K_i\ prom$	Promedio $K_i$
$\Delta w\ prom$	Diferencia de velocidades promedio
$\theta\ prom$	Velocidad de desviación promedio

Tabla 20. Significado de notaciones de los resultados numéricos.

#### 4.2. Resultados gráficos y numéricos.

##### 4.2.1. Sistema de autosintonización de 3 zonas

##### a) Setpoint por motor de 60 RPM

- Motor izquierdo superior

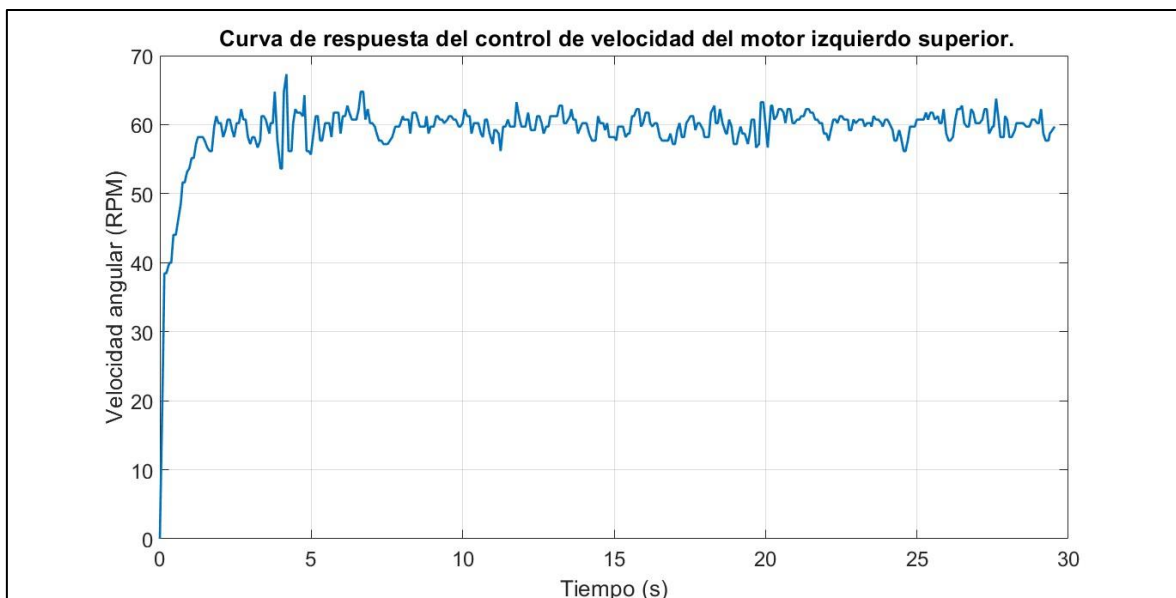
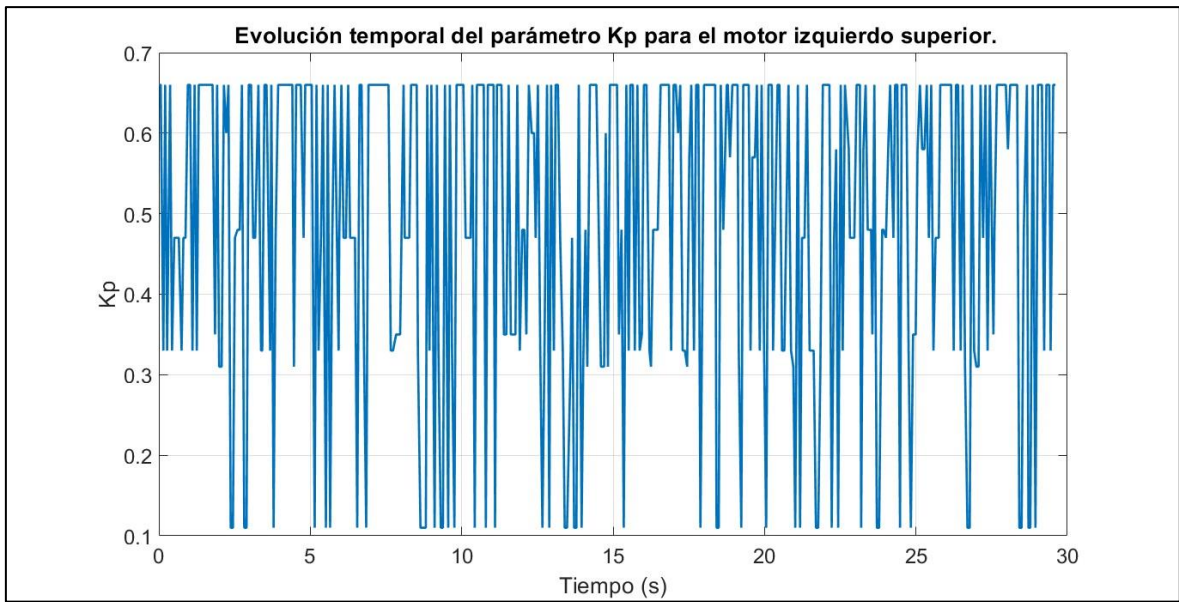
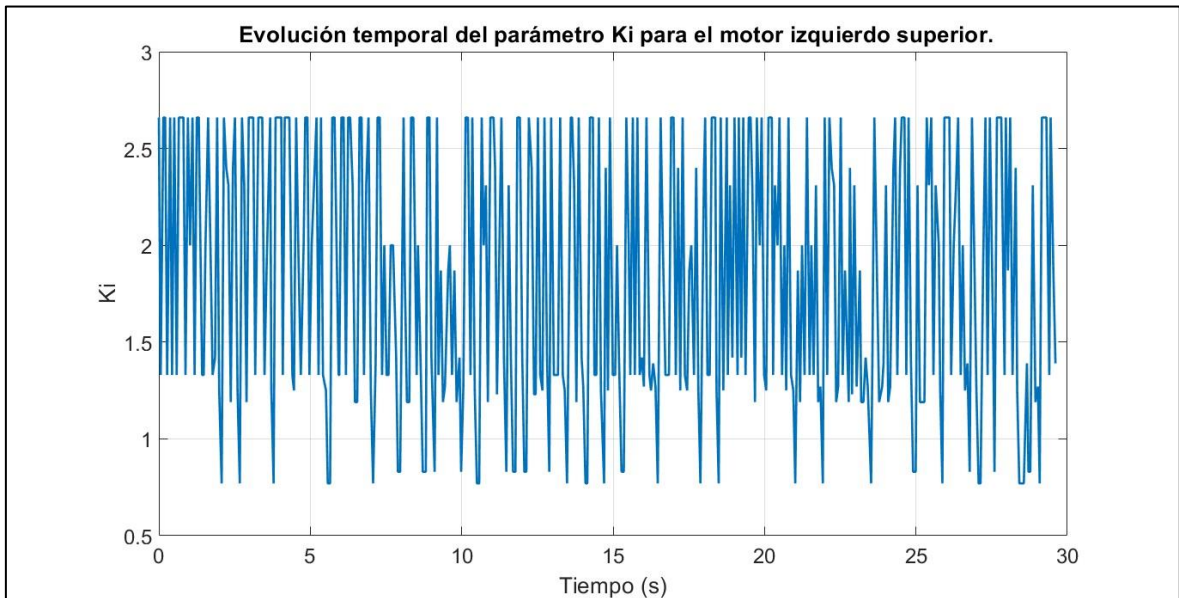


Gráfico 46. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.



*Gráfico 47. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.*



*Gráfico 48. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.*

- Motor derecho superior

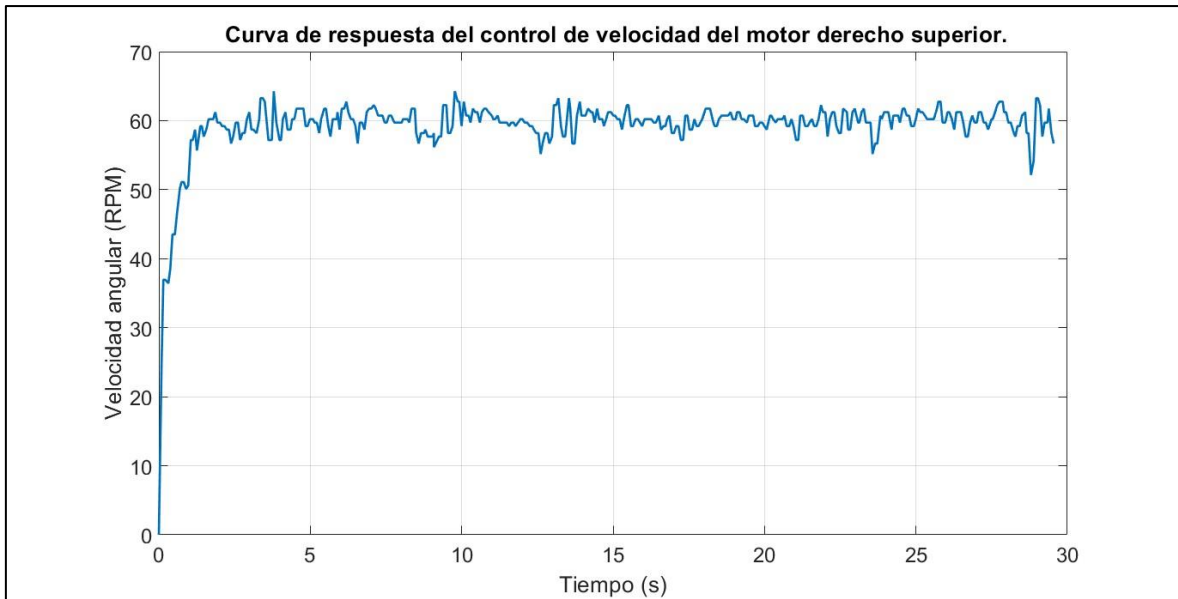


Gráfico 49. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

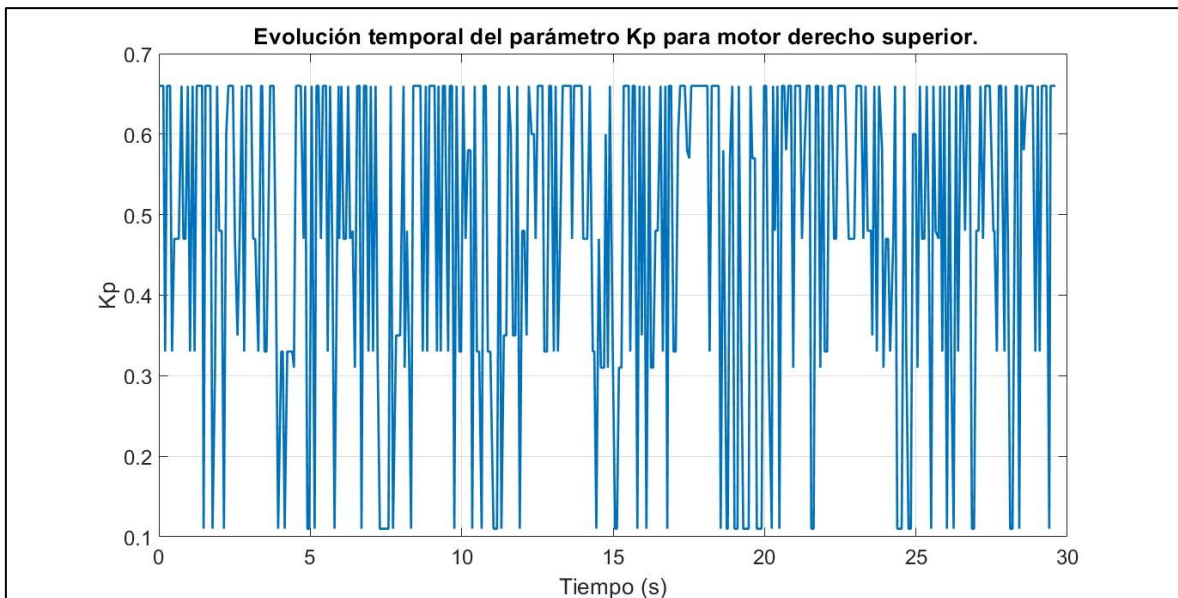


Gráfico 50. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

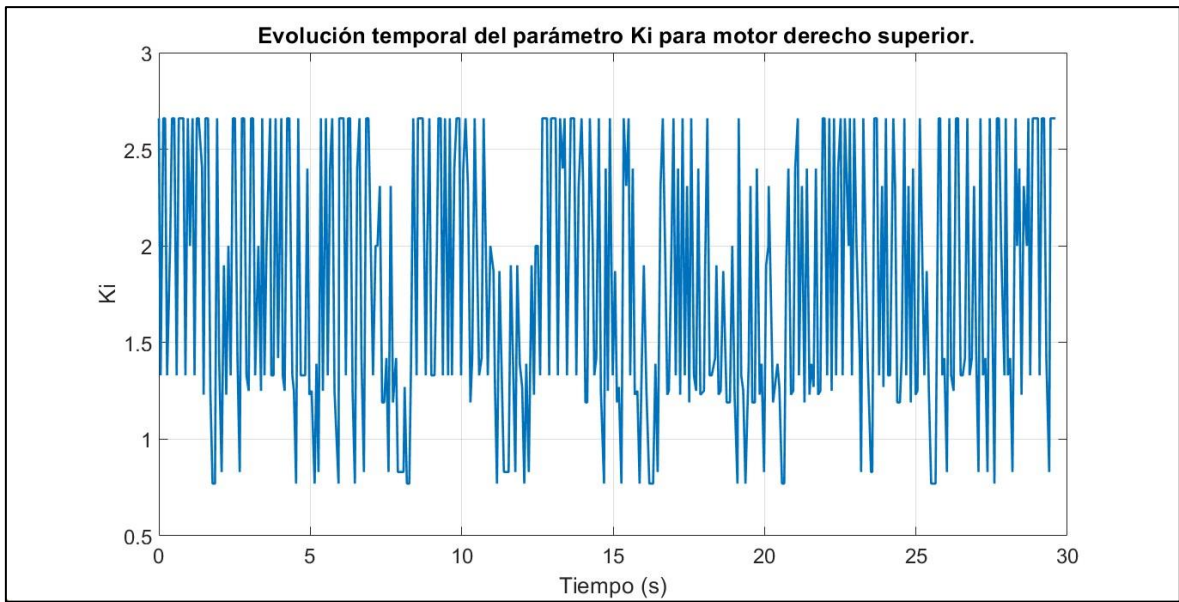


Gráfico 51. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

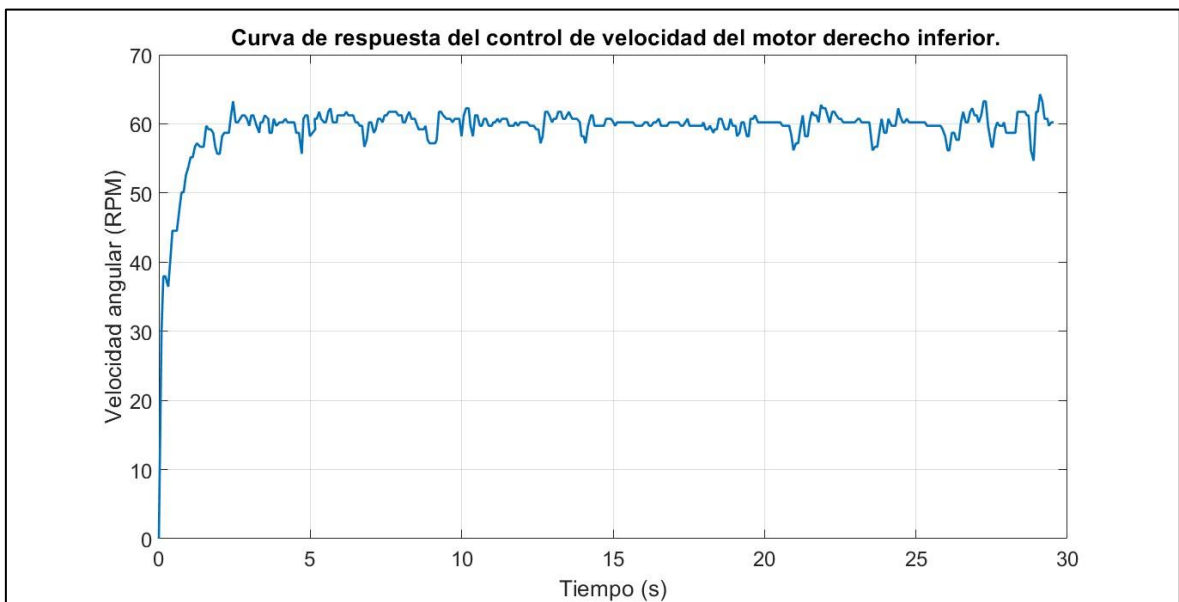
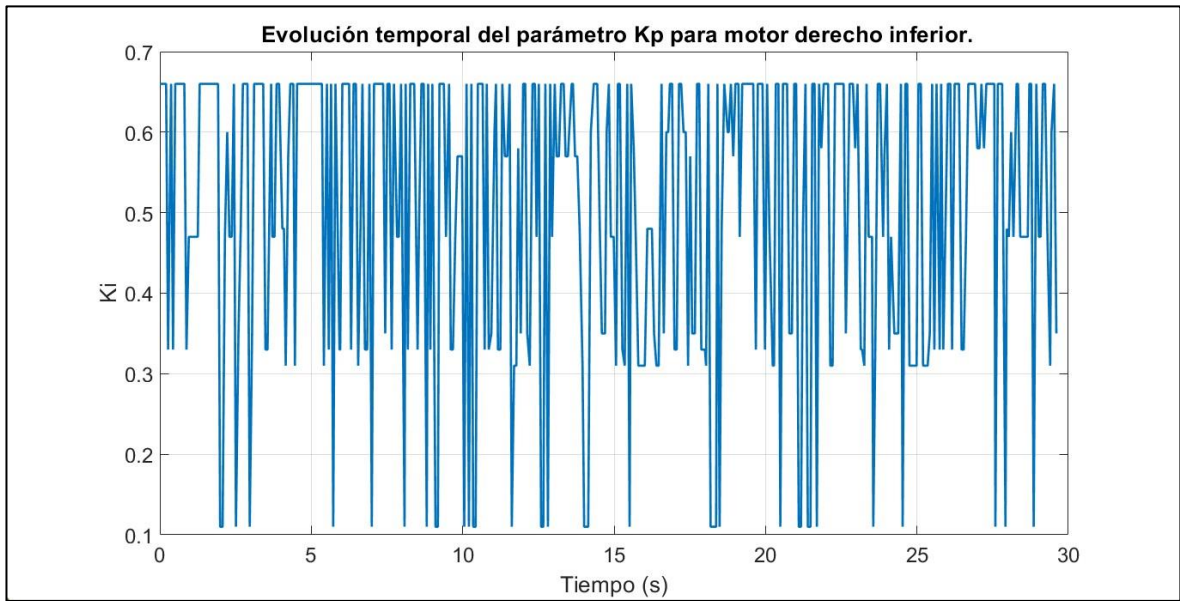
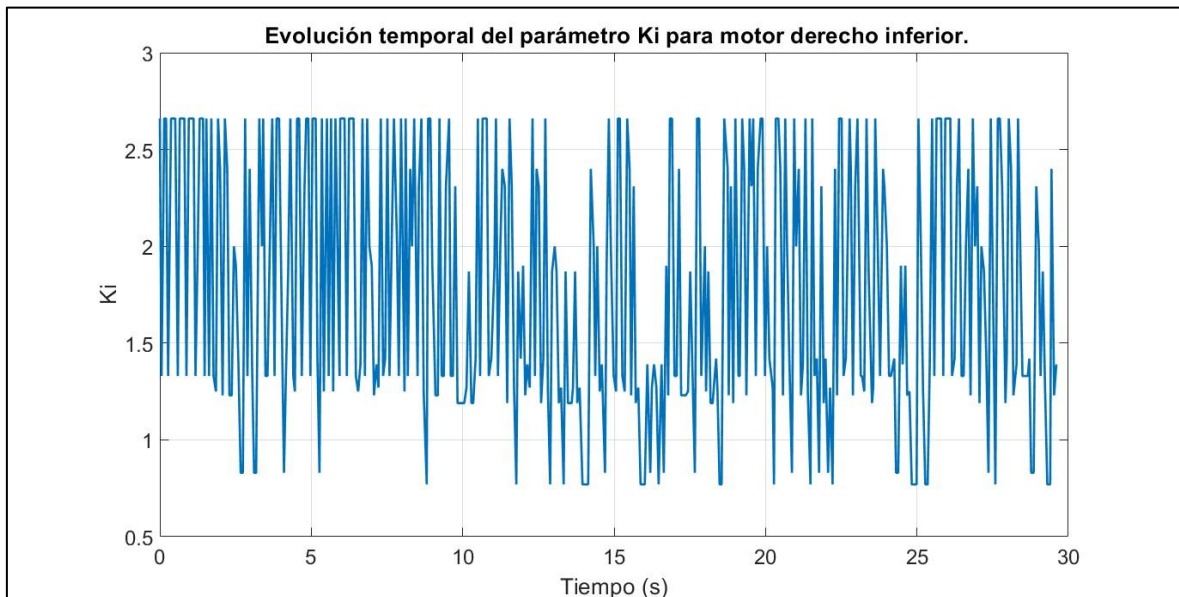


Gráfico 52. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.



*Gráfico 53. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.*



*Gráfico 54. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.*

- Motor izquierdo inferior

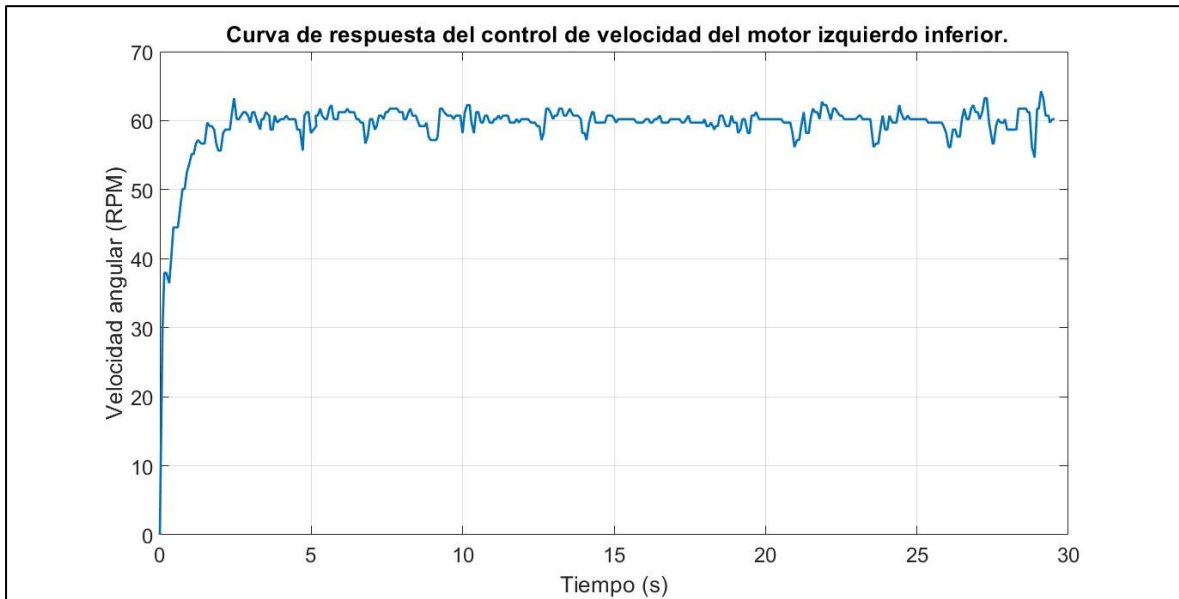


Gráfico 55. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

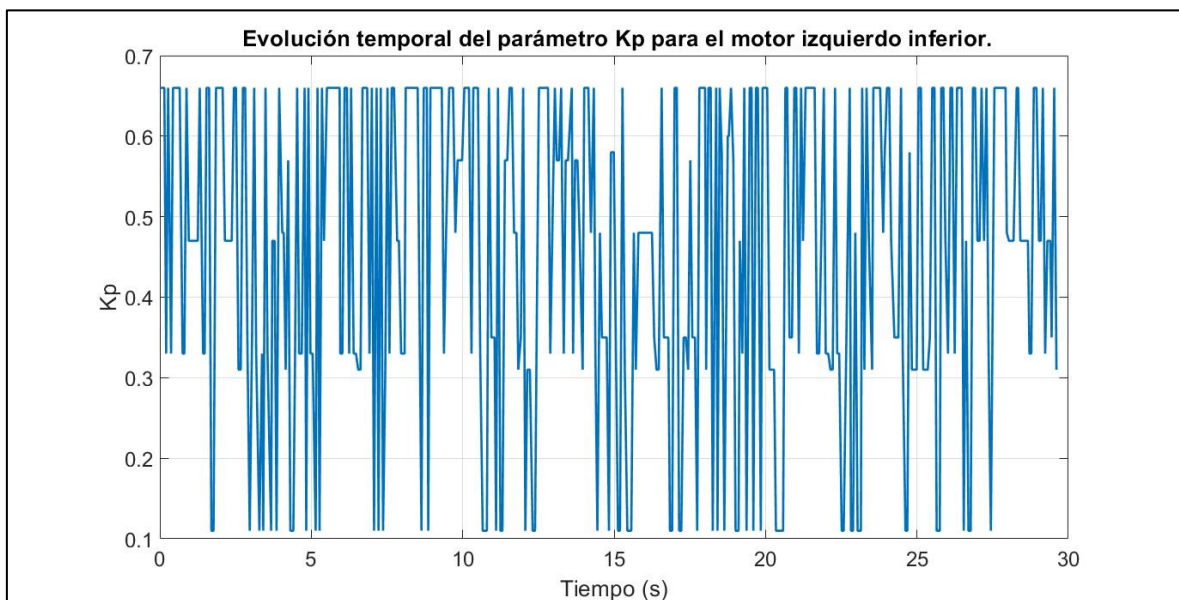


Gráfico 56. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

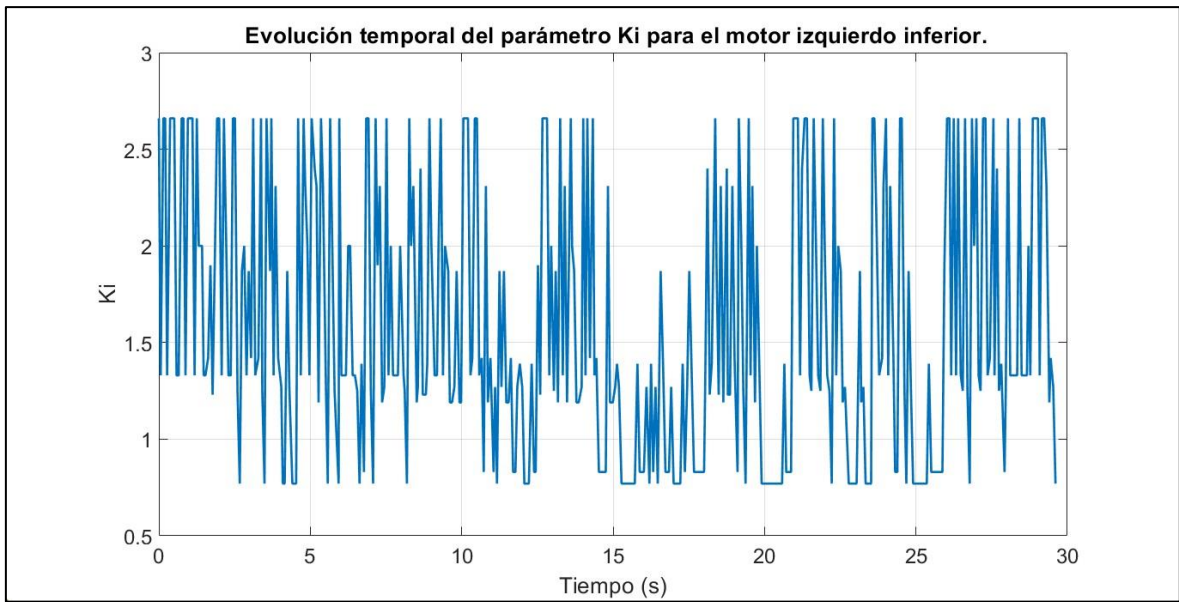


Gráfico 57. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

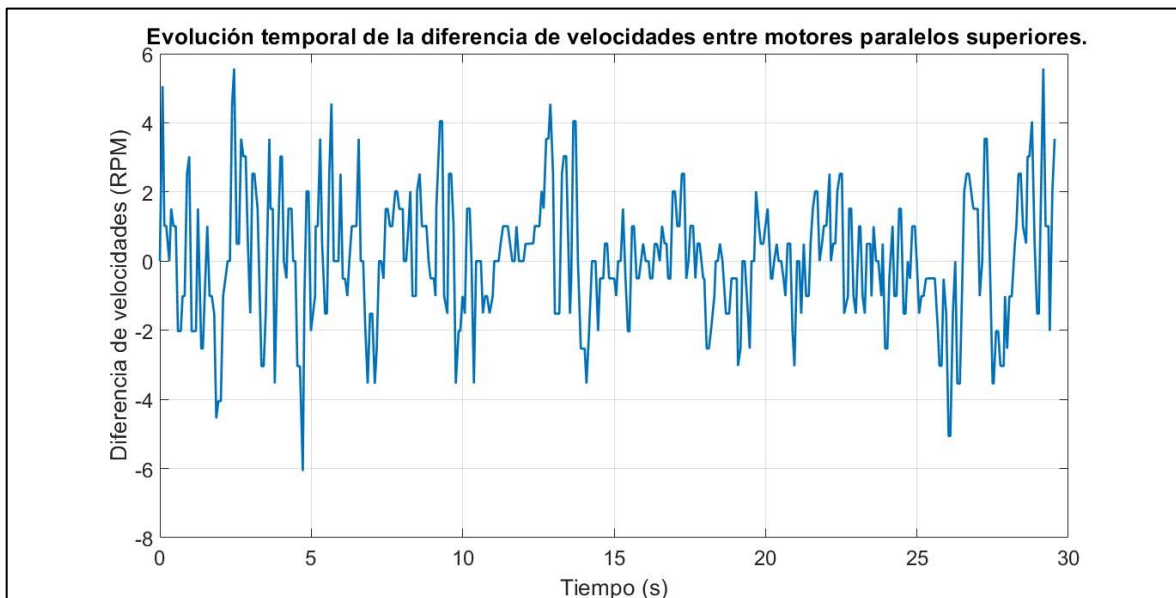


Gráfico 58. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

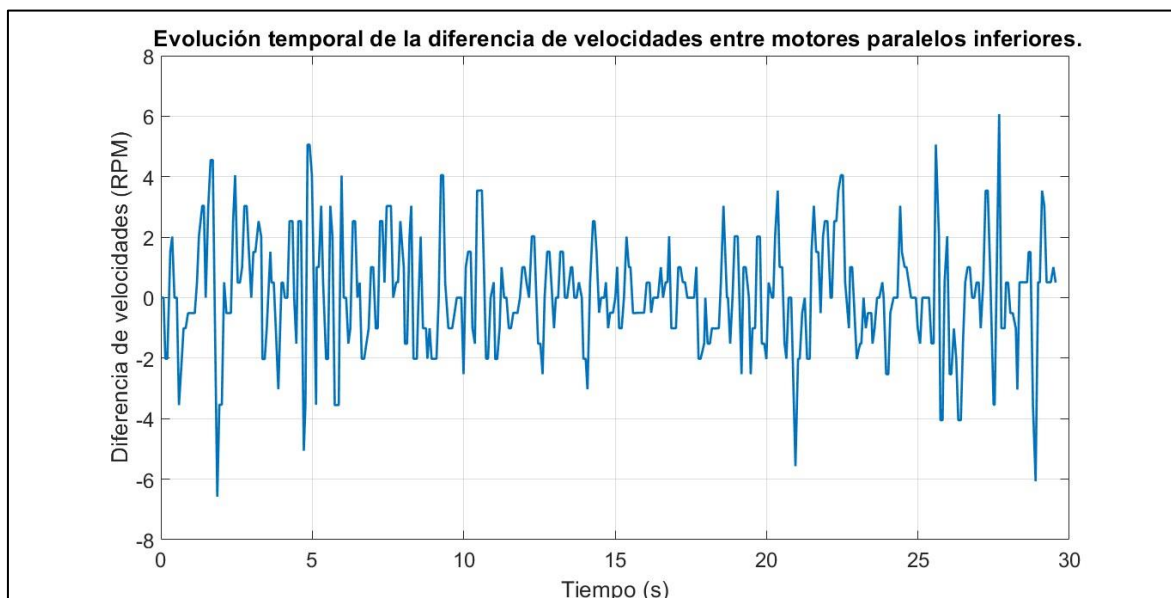


Gráfico 59. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=60 RPM, N° zonas=3										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom  (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	$\Delta w$ prom (RPM)
MOTOR 1	1.715	0.09	0.971	1.865	12.183	1.323	2.204	0.489	1.819	0.064
MOTOR 2	1.369	0.09	0.821	1.865	7.117	1.224	2.04	0.478	1.790	
MOTOR 3	1.865	0.09	0.971	1.865	7.117	1.172	1.953	0.505	1.775	0.093
MOTOR 4	2.452	0.087	0.969	2.452	7.117	0.939	1.565	0.456	1.58	
Promedios	1.850	0.089	0.933	2.012	8.384	1.165	1.941	0.482	1.741	

Tabla 21. Características en el dominio del tiempo de los motores para un setpoint de 60 RPM y autosintonización de 3 zonas.



b) Setpoint por motor de 70 RPM

- Motor izquierdo superior

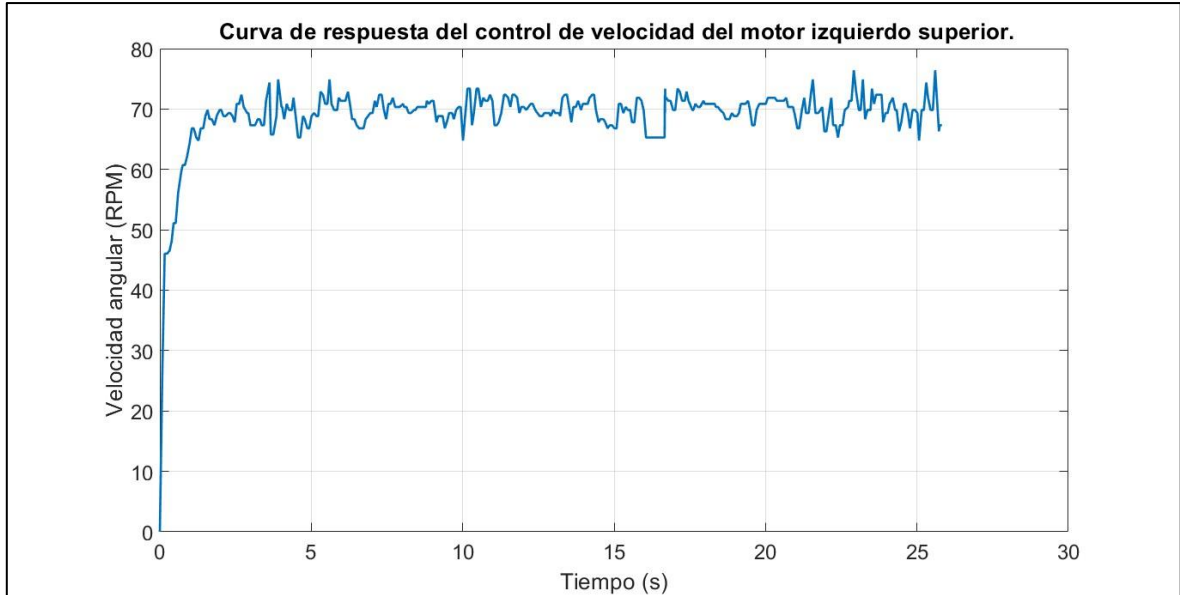


Gráfico 60. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.

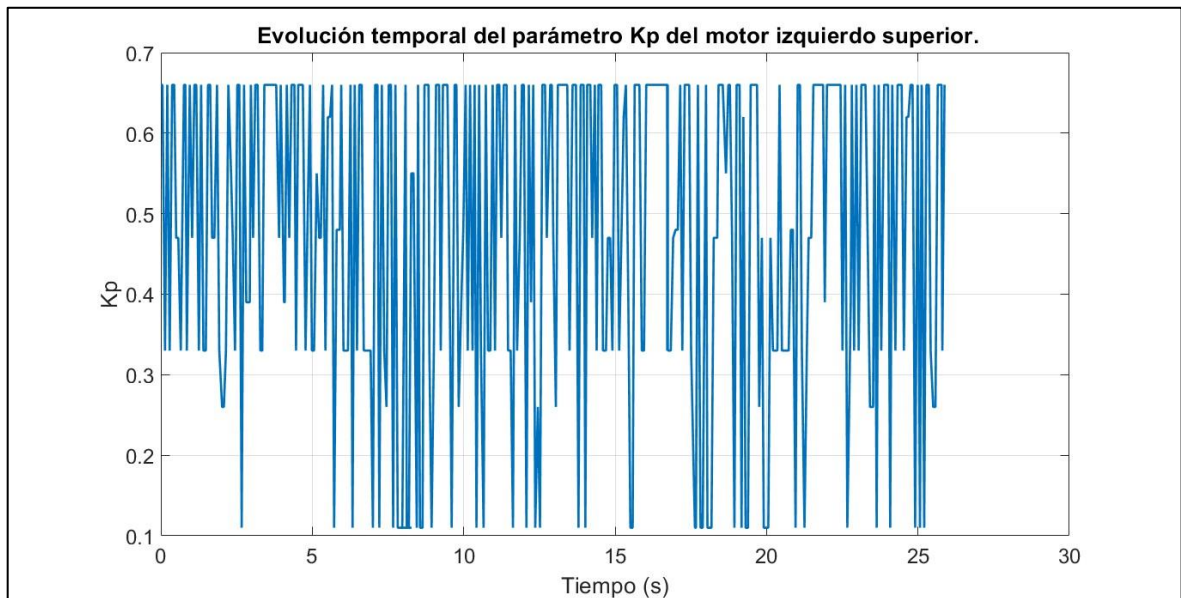


Gráfico 61. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.

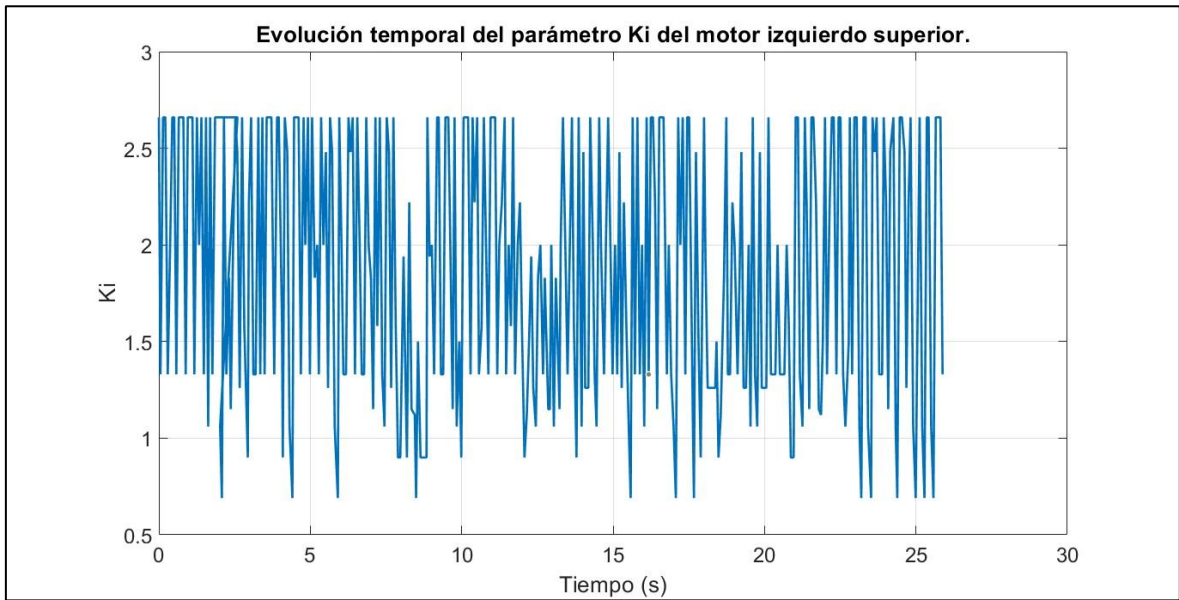


Gráfico 62. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Motor derecho superior

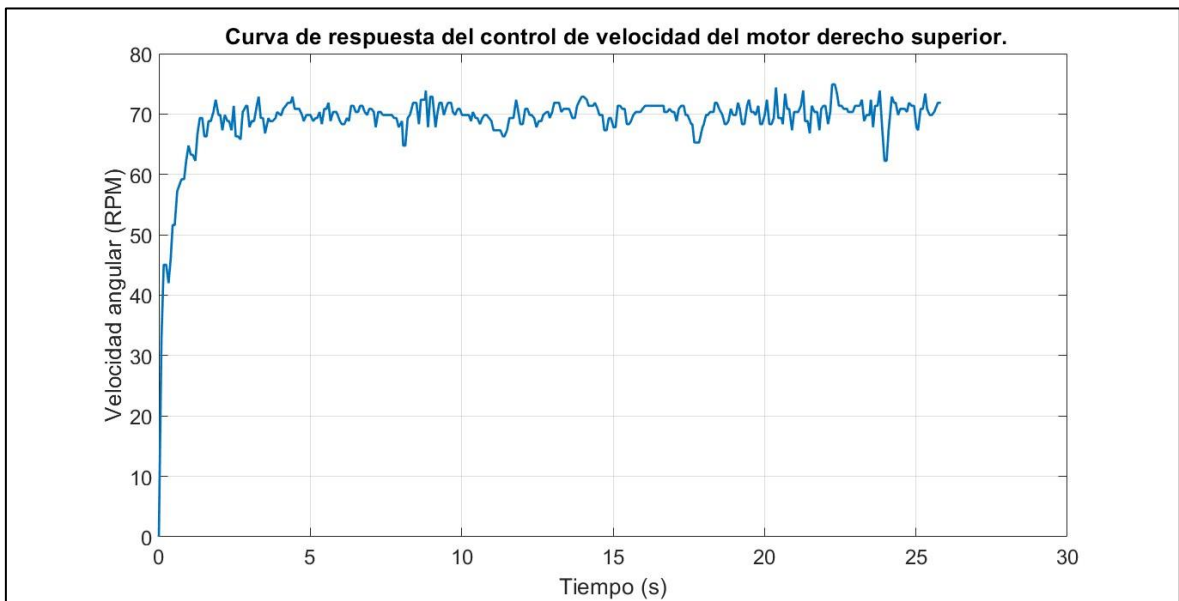


Gráfico 63. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

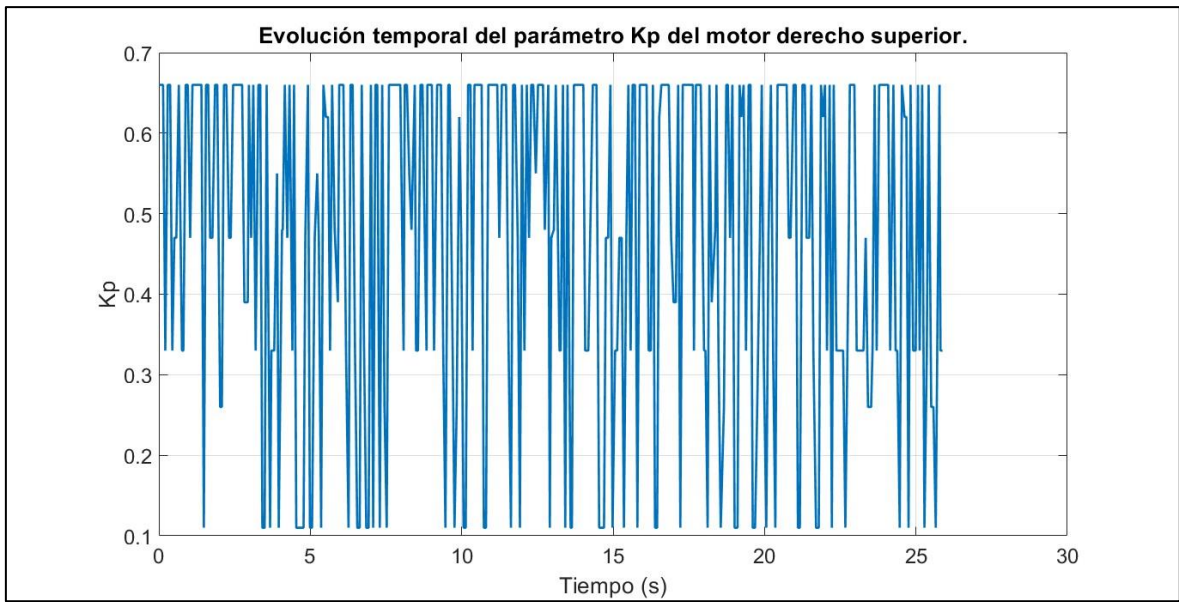


Gráfico 64. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

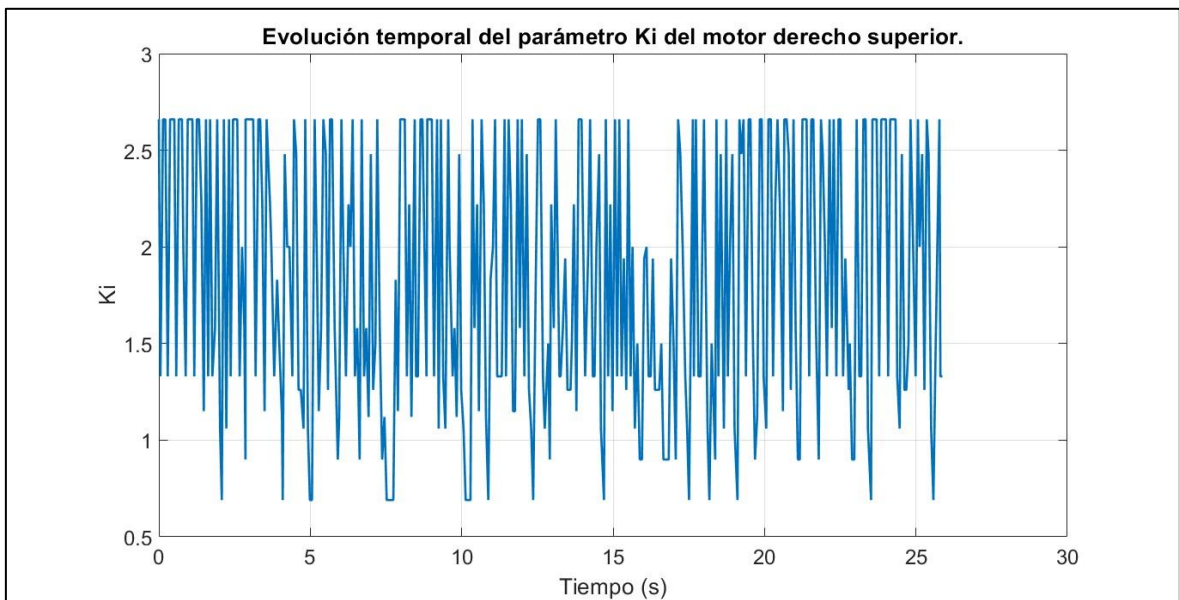


Gráfico 65. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

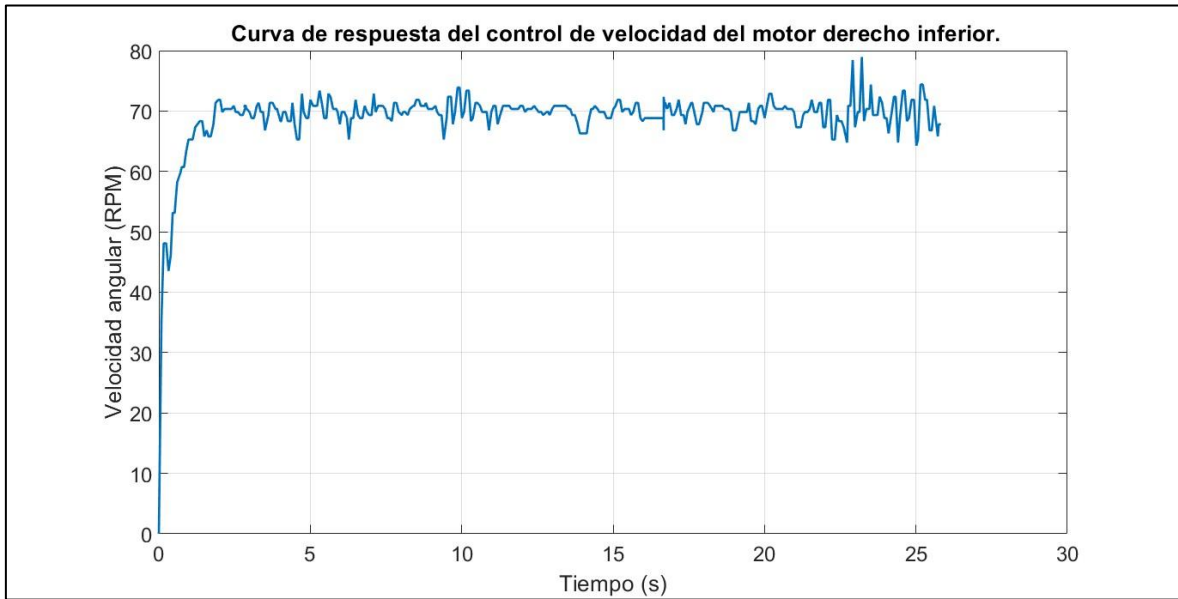


Gráfico 66. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

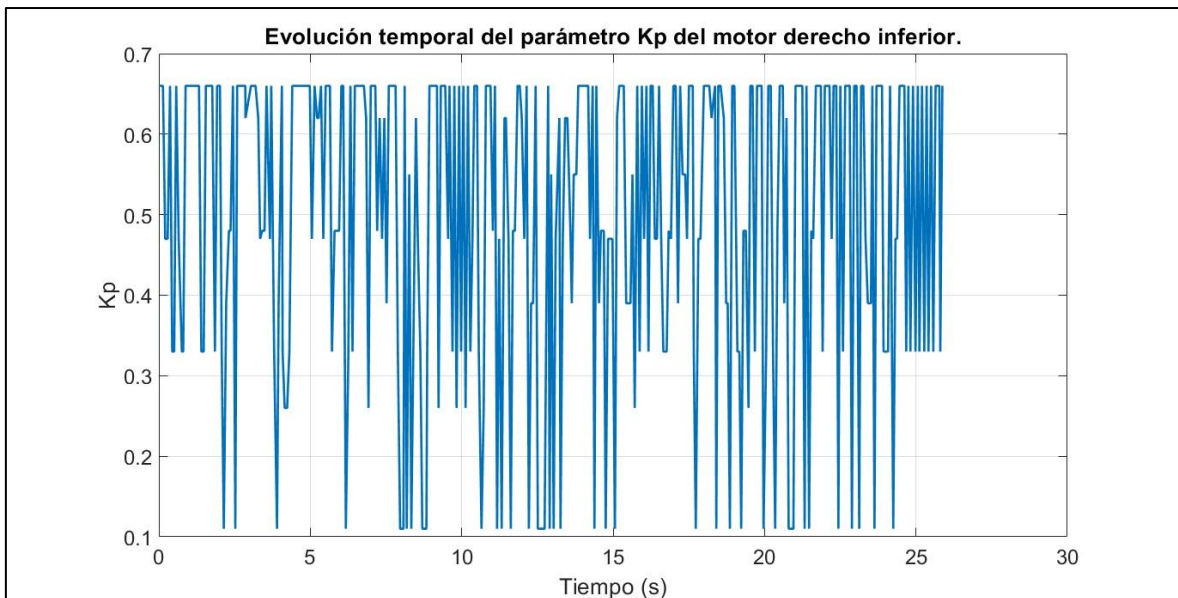


Gráfico 67. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

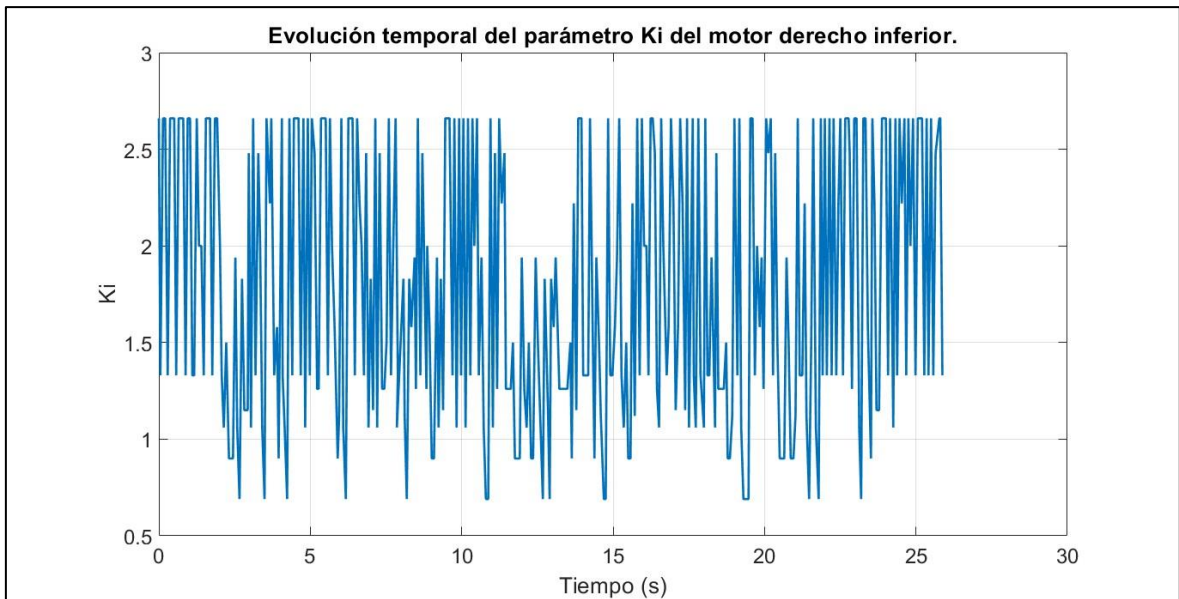


Gráfico 68. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

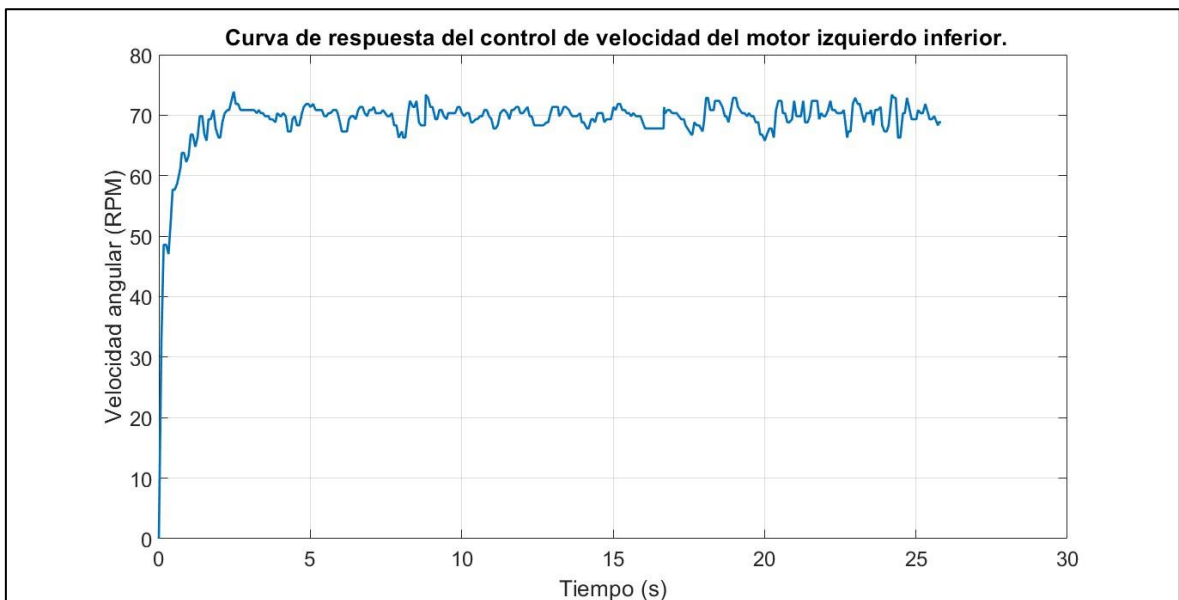
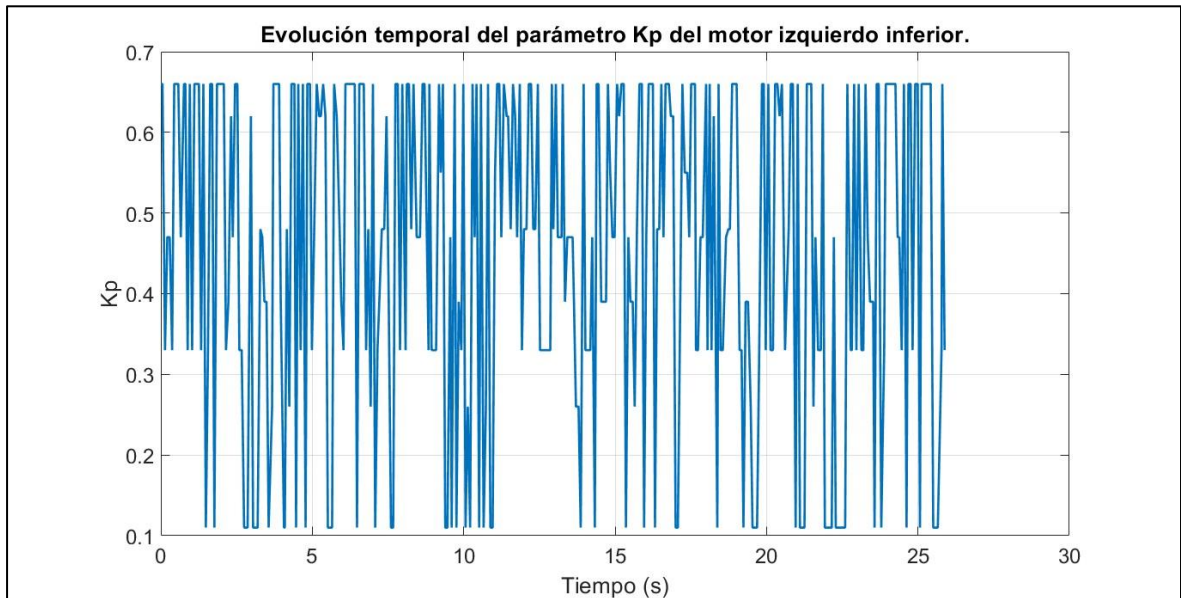
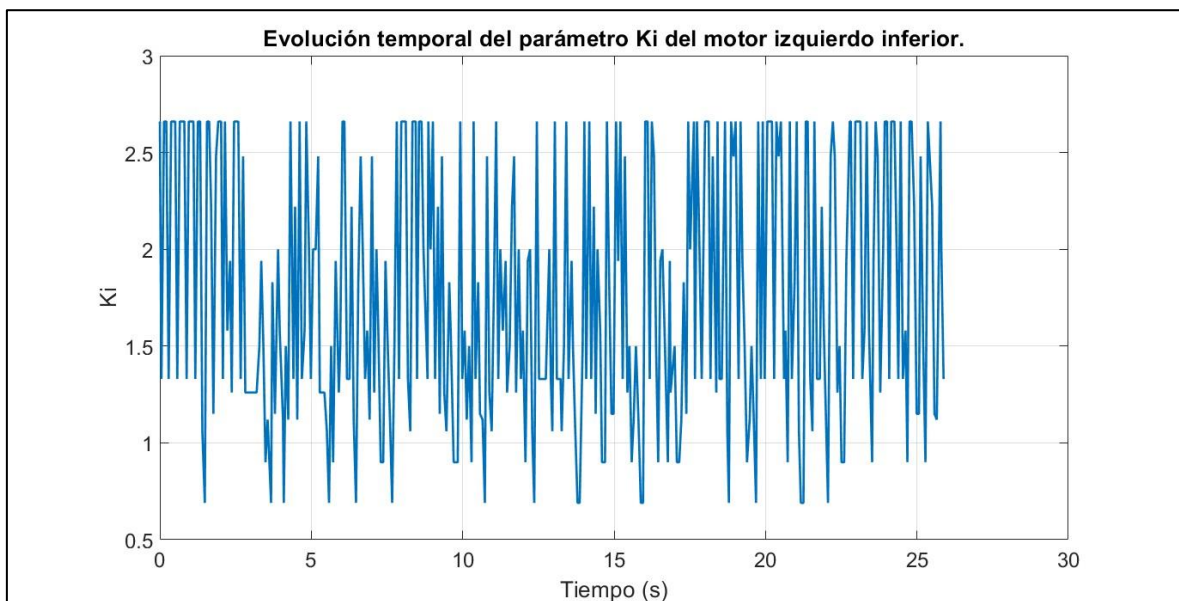


Gráfico 69. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.



*Gráfico 70. Evolución temporal del parámetro Kp del motor izquierdo inferior.*



*Gráfico 71. Evolución temporal del parámetro Ki del motor izquierdo inferior.*

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

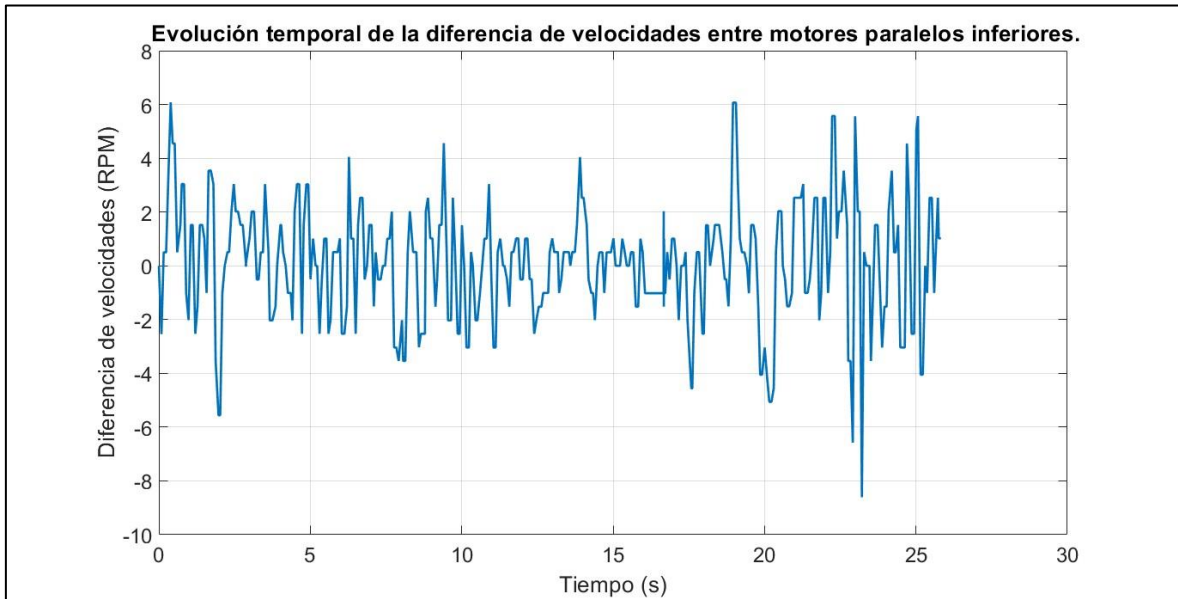


Gráfico 72. Evolución temporal de la diferencia de velocidades entre motores inferiores.

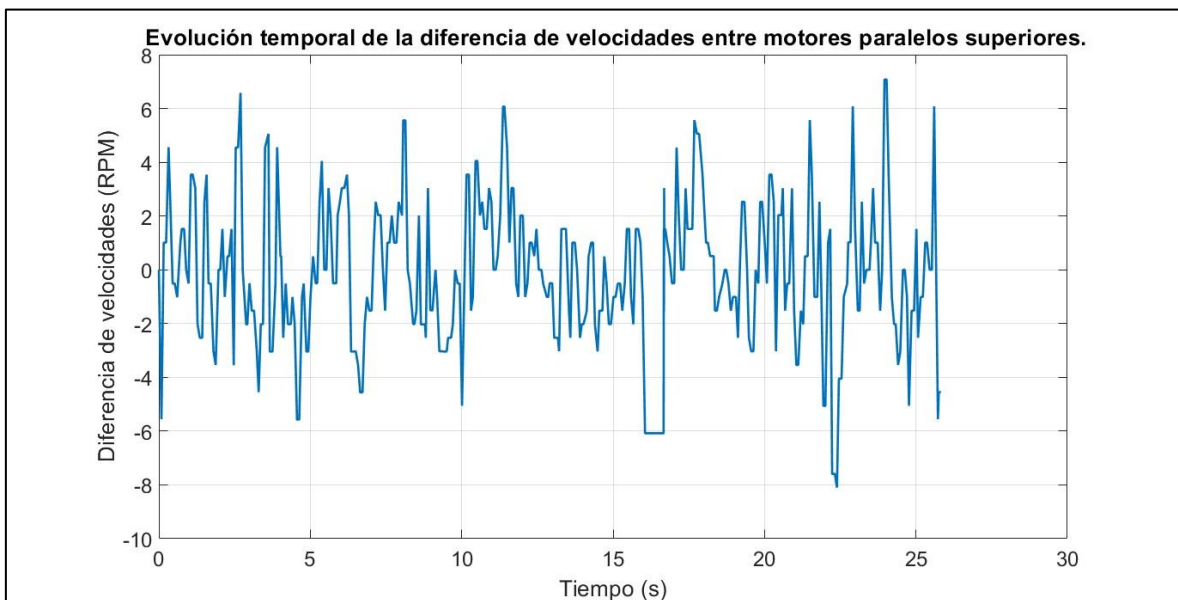


Gráfico 73. Evolución temporal de la diferencia de velocidades entre motores superiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=70 RPM, N° zonas=3										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1	1.351	0.085	0.903	2.696	9.1714	1.538	2.198	0.476	1.863	-0.032
MOTOR 2	1.278	0.087	0.903	1.876	7	1.358	1.94	0.471	1.824	
MOTOR 3	1.715	0.086	0.901	1.968	12.786	1.339	1.913	0.498	1.778	0.112
MOTOR 4	1.277	0.085	0.757	1.802	5.557	1.19	1.7	0.451	1.764	
Promedio	1.405	0.086	0.866	2.086	8.629	1.35	1.938	0.474	1.807	

Tabla 22. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 70 RPM y autosintonizados con 3 zonas.

c) Setpoint por motor de 80 RPM

- Motor izquierdo superior

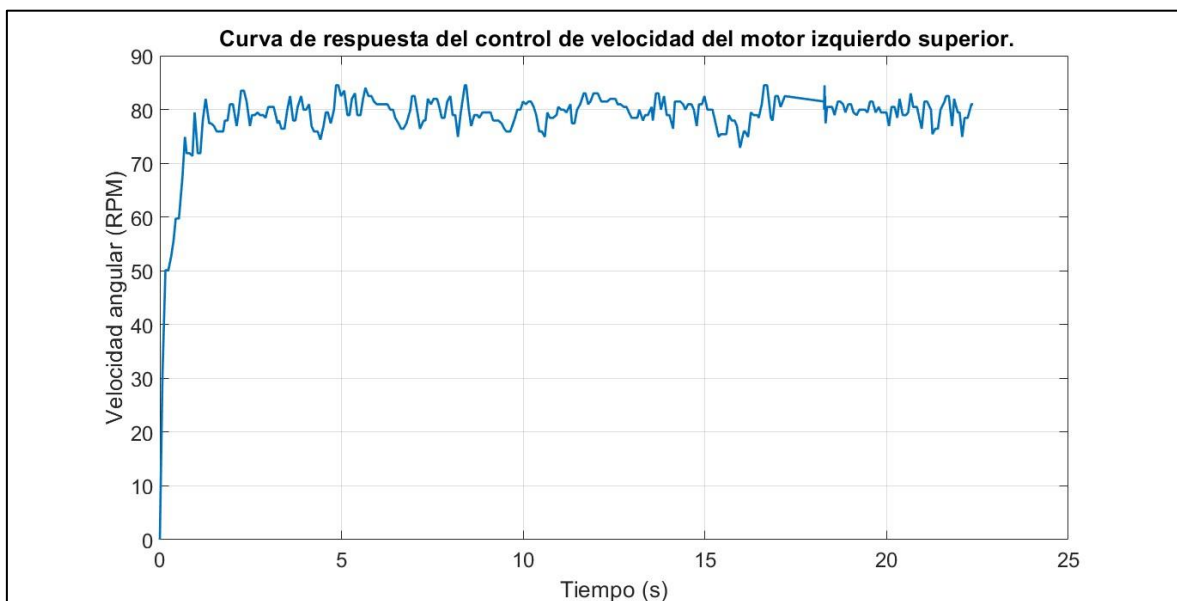


Gráfico 74. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.



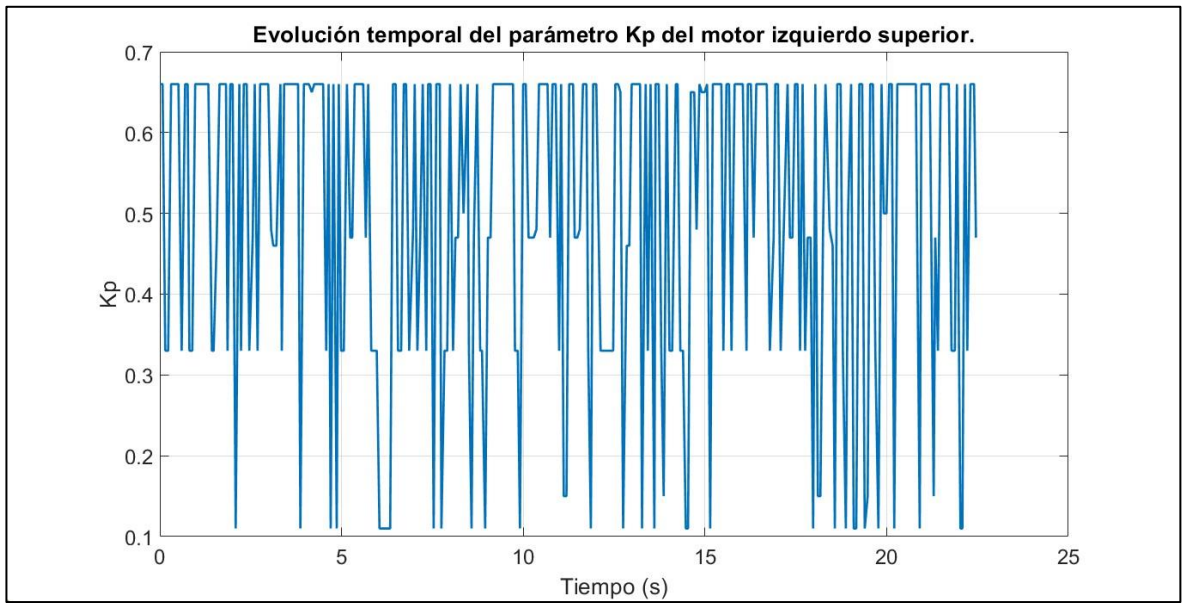


Gráfico 75. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.

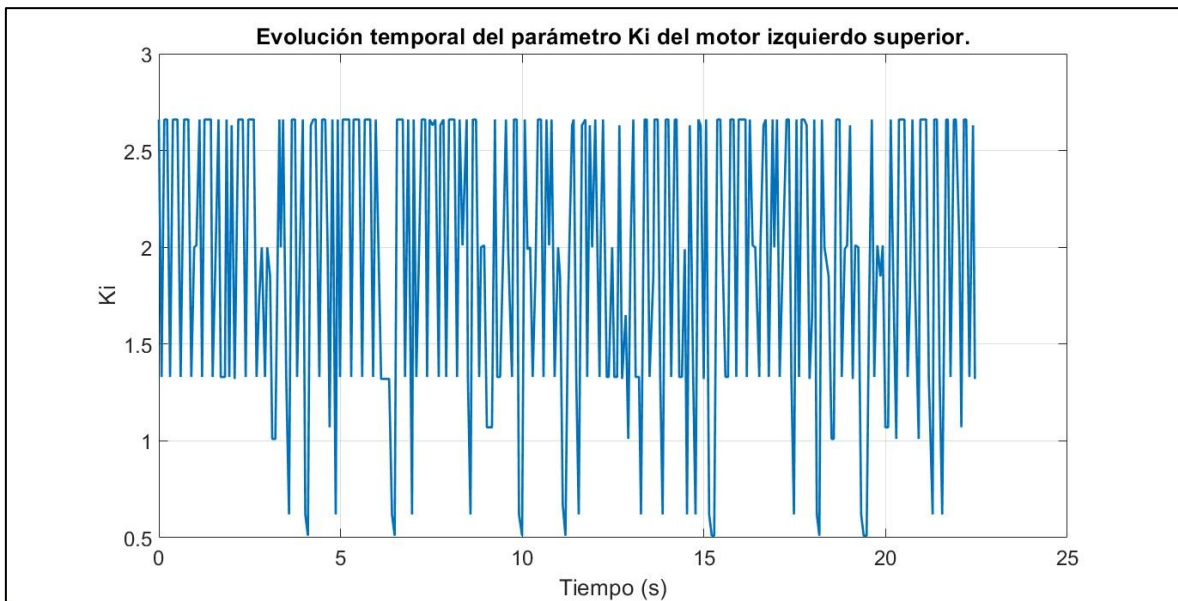


Gráfico 76. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.

- Motor derecho superior

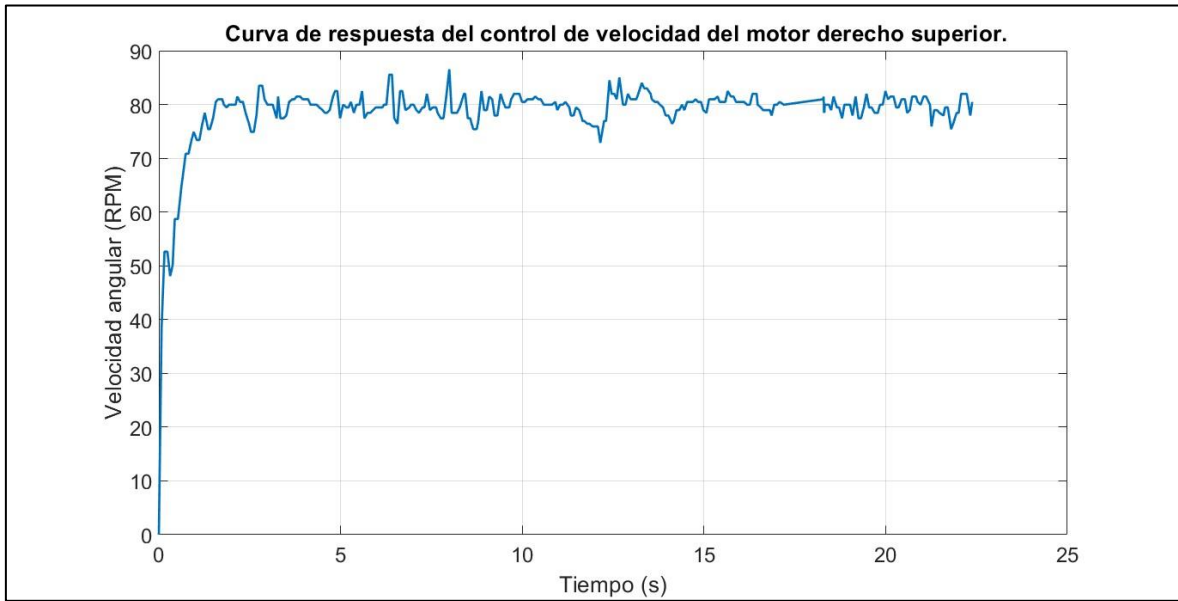


Gráfico 77. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

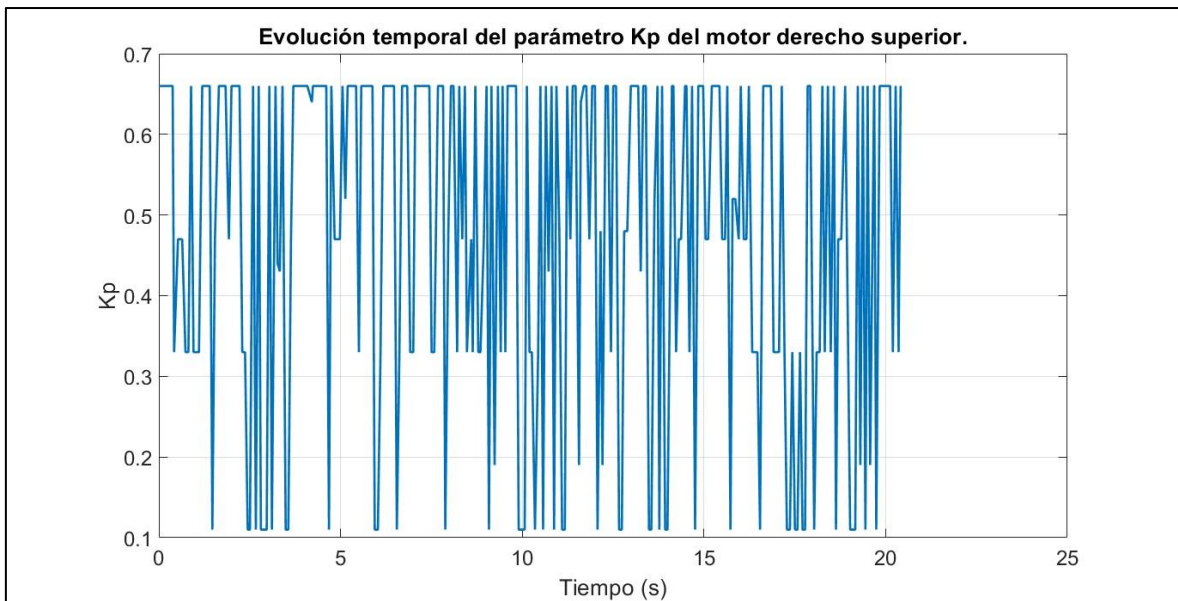


Gráfico 78. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

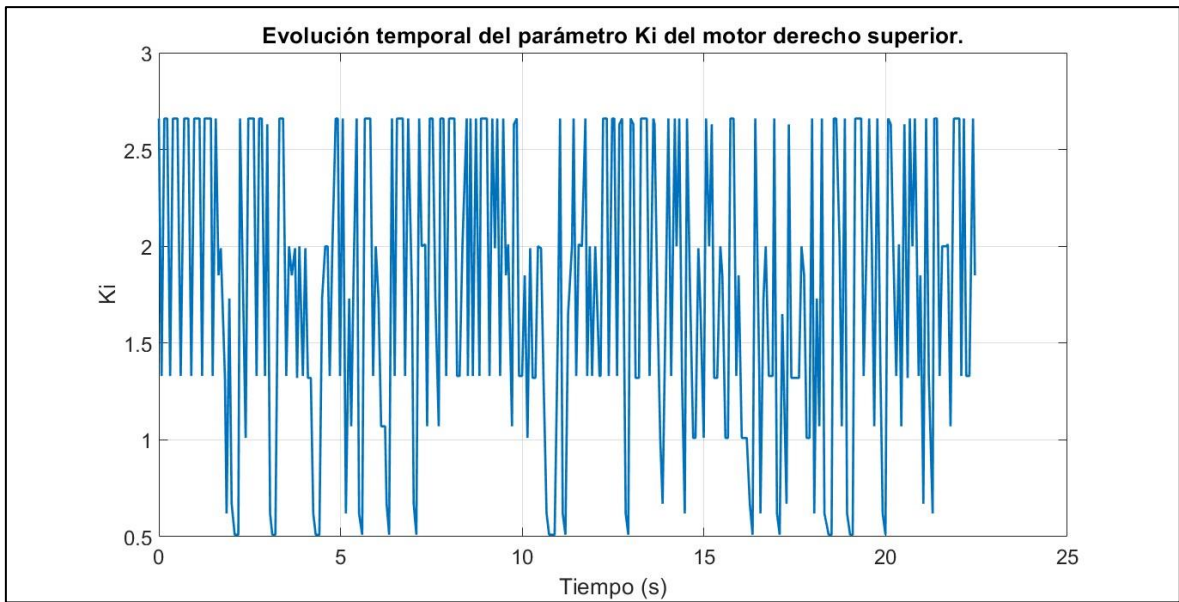


Gráfico 79. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

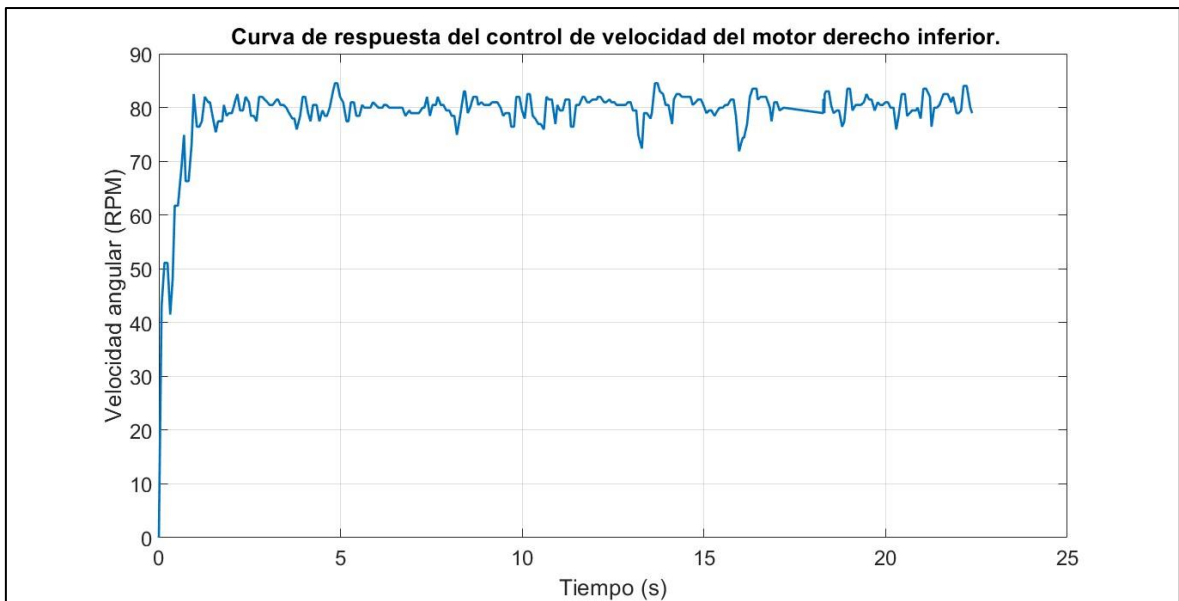


Gráfico 80. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

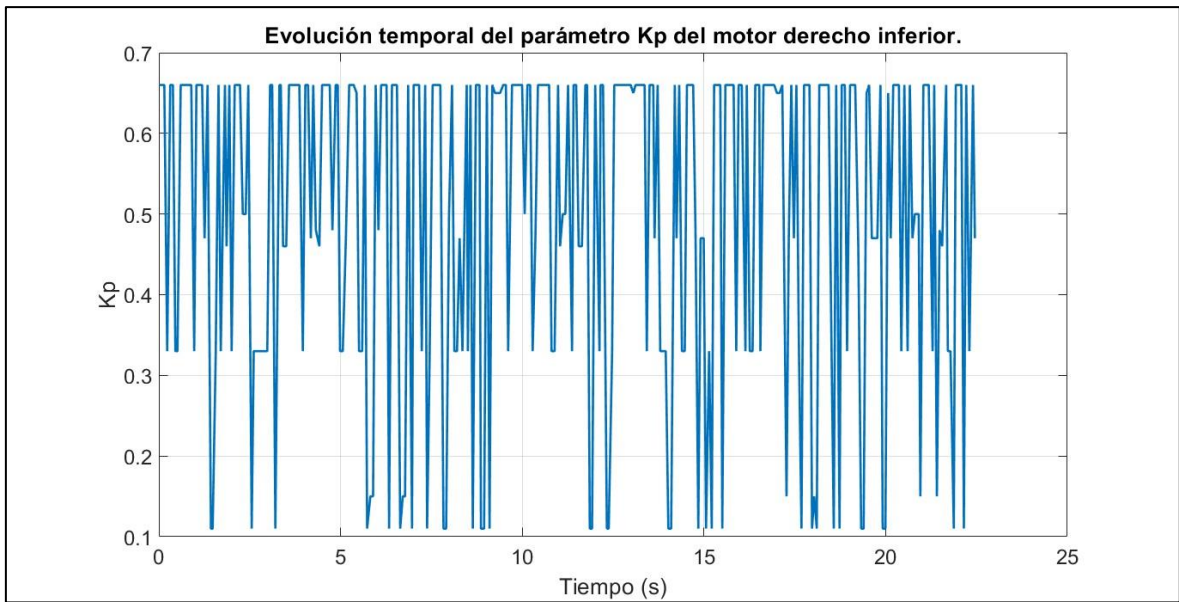


Gráfico 81. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

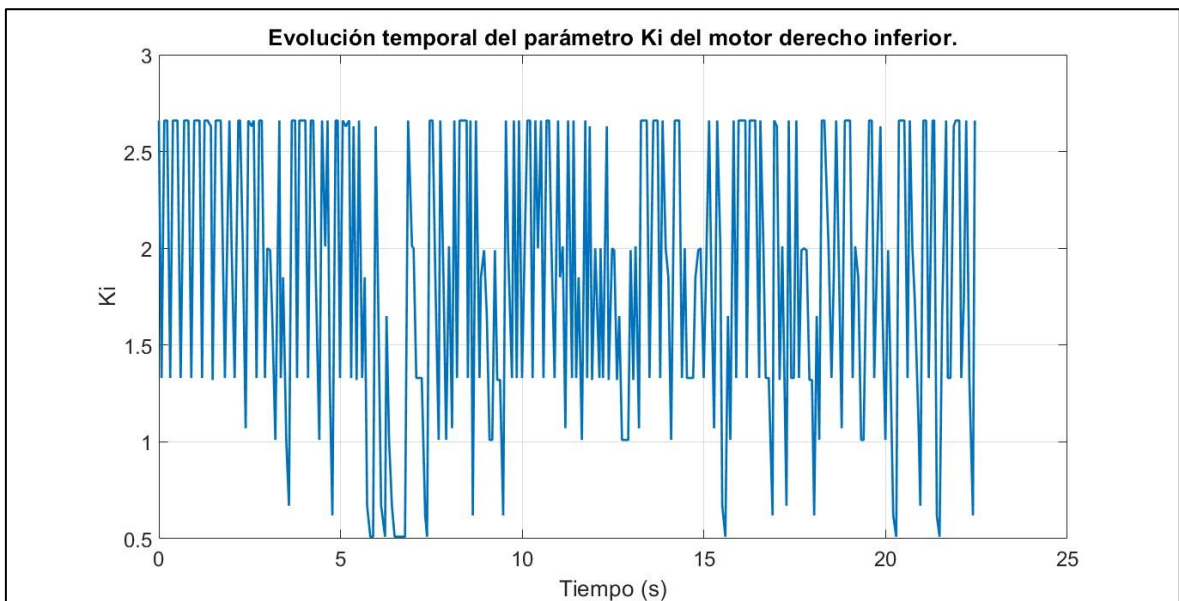


Gráfico 82. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

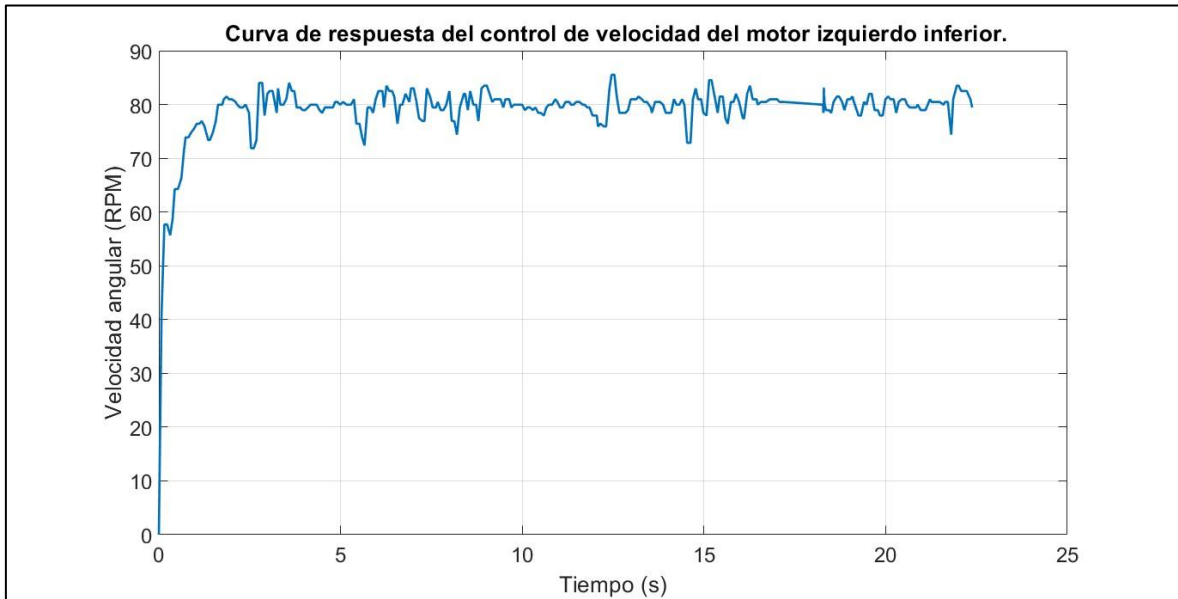


Gráfico 83. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

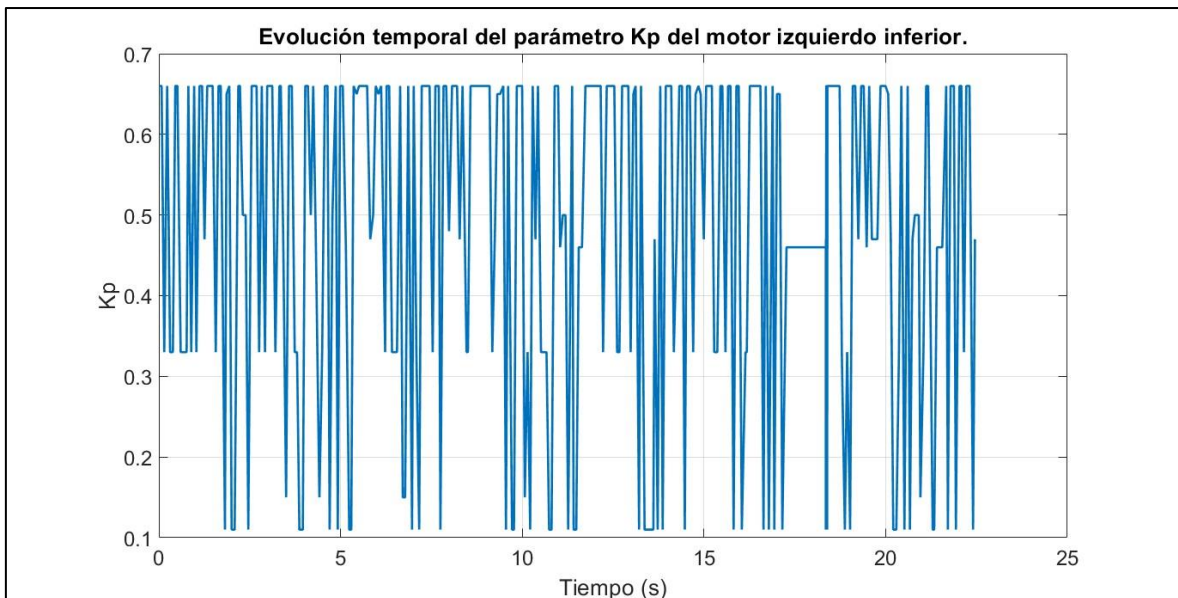


Gráfico 84. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

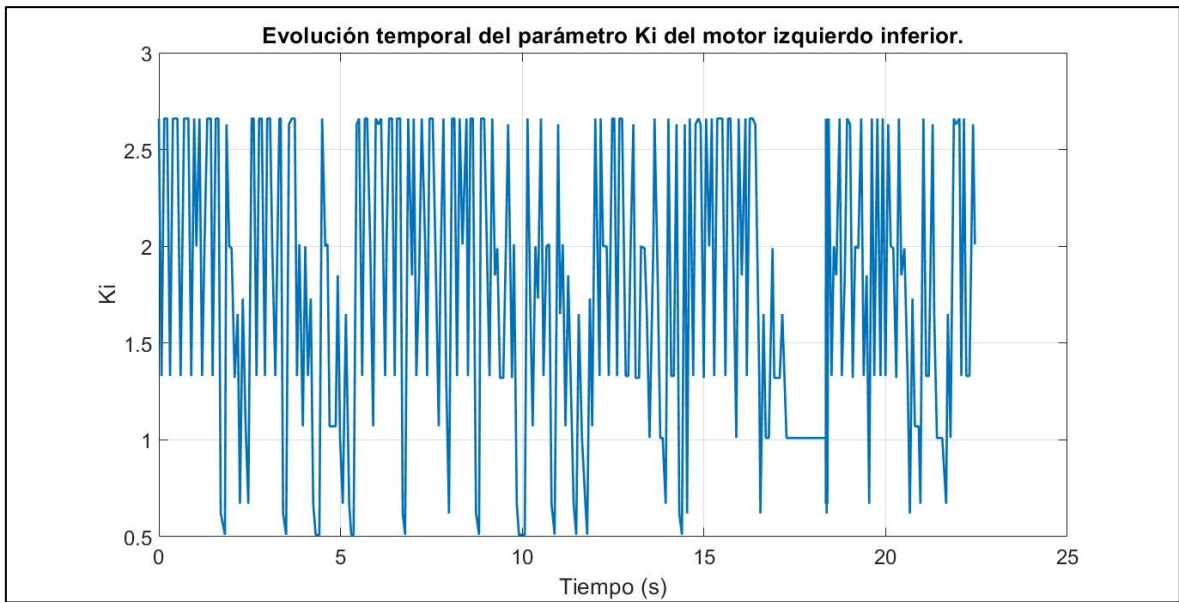


Gráfico 85. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

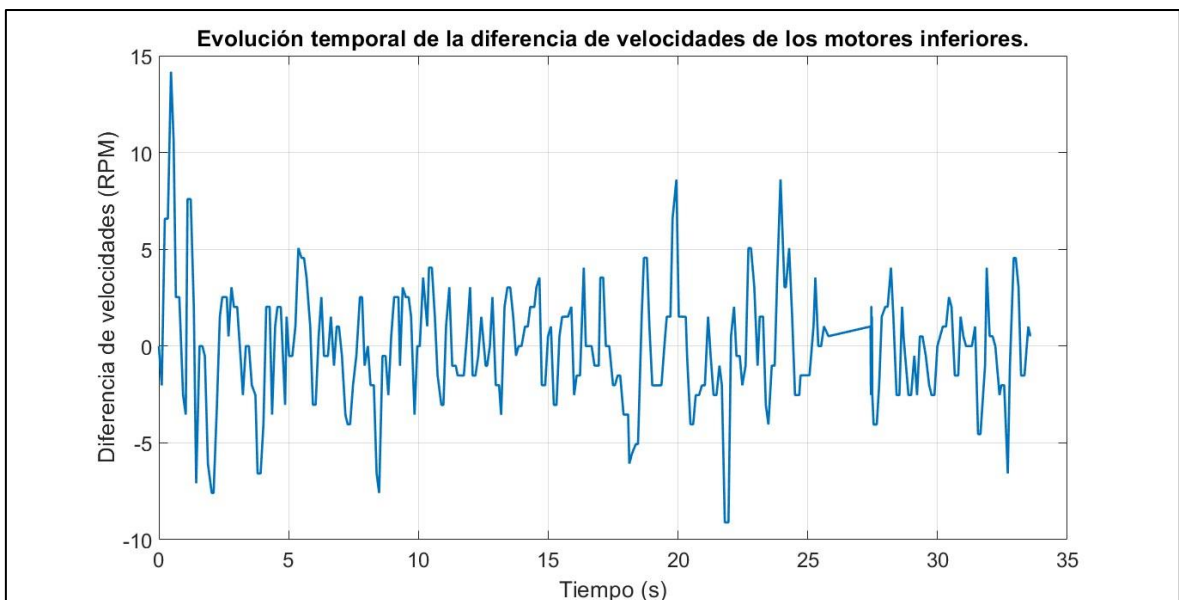


Gráfico 86. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

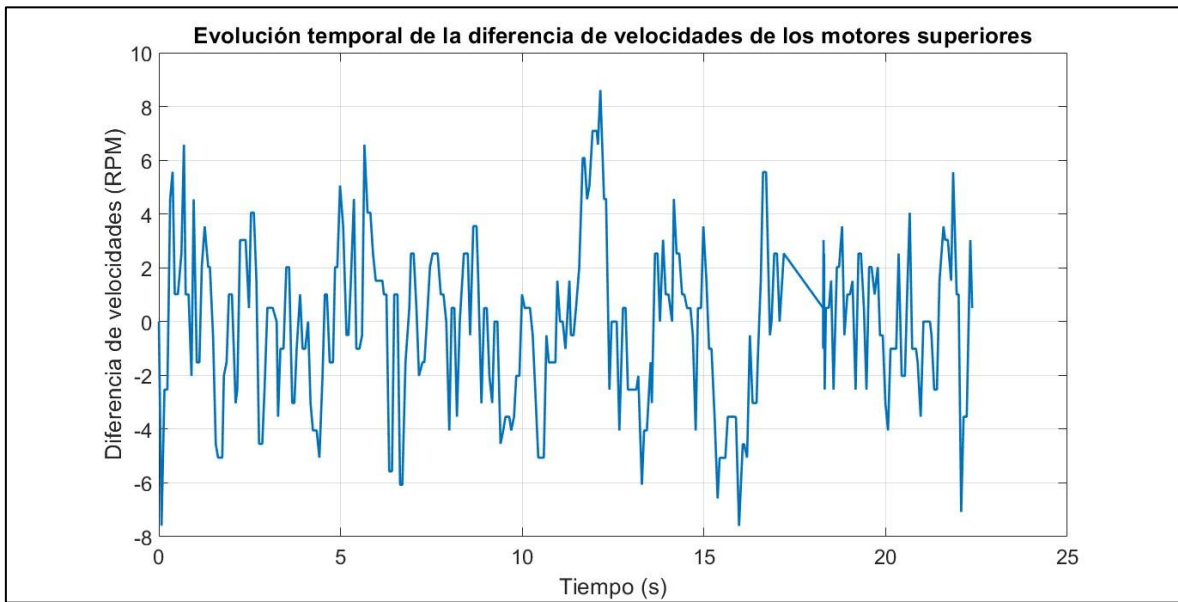


Gráfico 87. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=80 RPM, N° zonas=3										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	$\Delta w$ prom (RPM)
MOTOR 1	1.566	0.073	0.69	1.26	5.637	1.7919	2.24	0.5	1.941	-0.064
MOTOR 2	1.491	0.075	0.738	1.629	8.175	1.403	1.753	0.468	1.787	
MOTOR 3	1.567	0.313	0.693	0.96	5.638	1.524	1.905	0.45	1.866	-0.059
MOTOR 4	1.567	0.074	0.69	1.864	6.912	1.4736	1.842	0.482	1.78	
Promedio	1.548	0.134	0.703	1.428	6.591	1.548	1.935	0.475	1.844	

Tabla 23. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 80 RPM y autosintonización de 3 zonas.

a) Setpoint por motor de 90 RPM

- Motor izquierdo superior

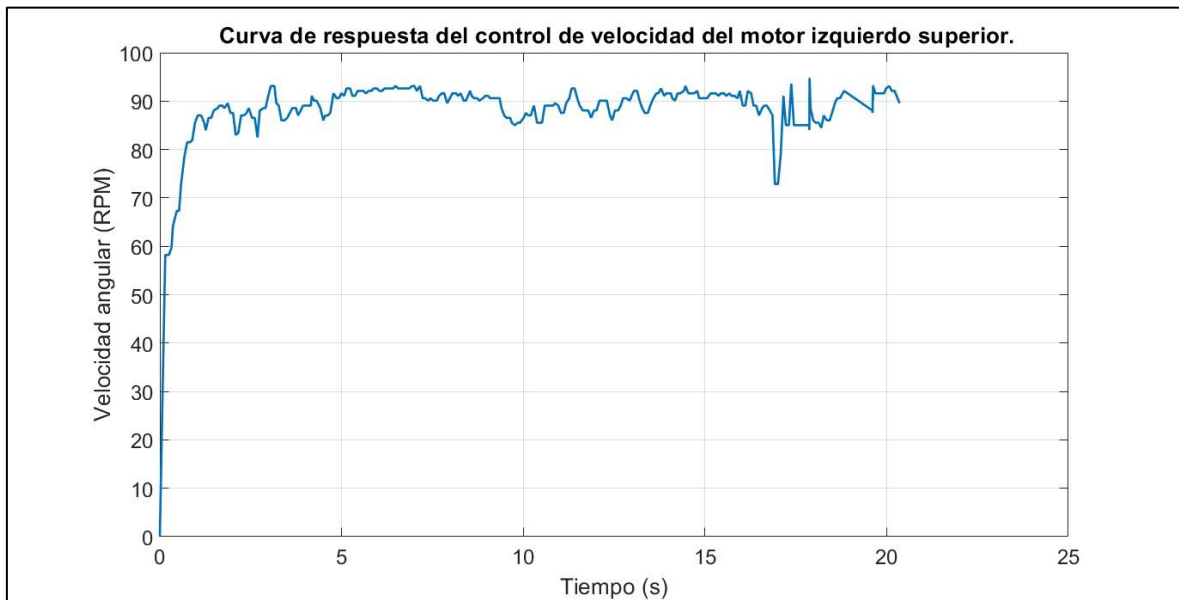


Gráfico 88. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.

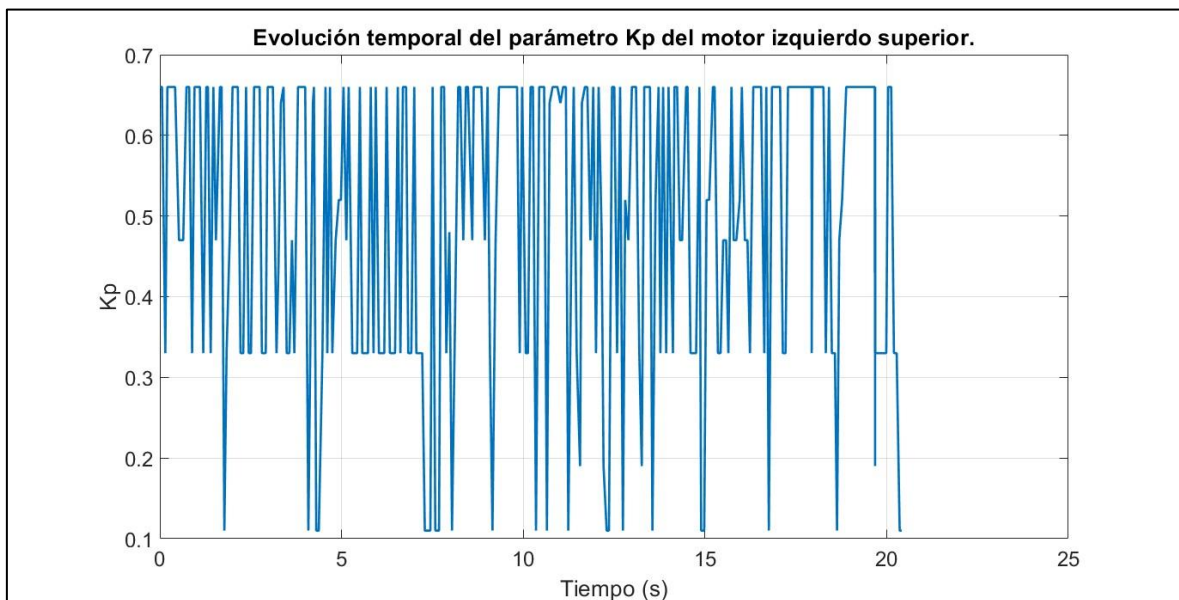


Gráfico 89. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.



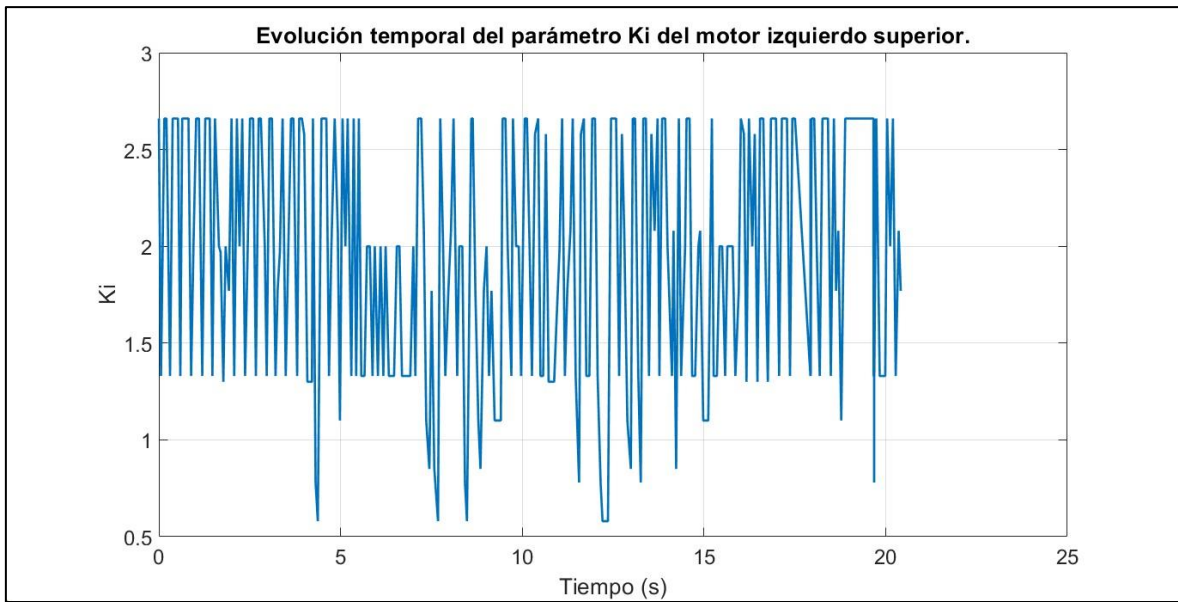


Gráfico 90. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.

- Motor derecho superior

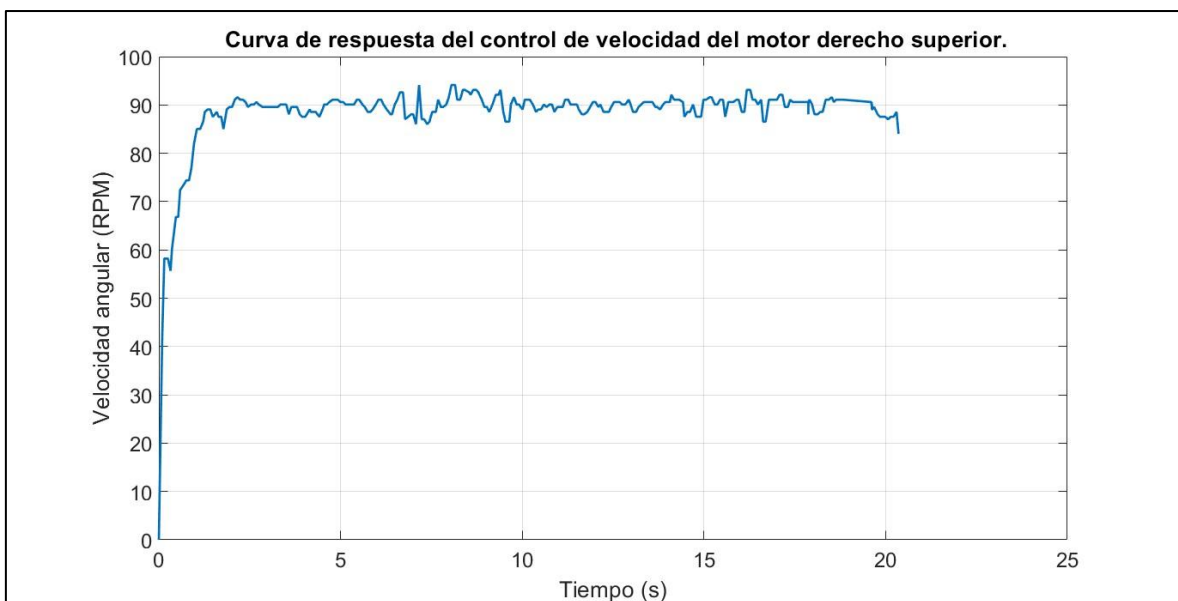
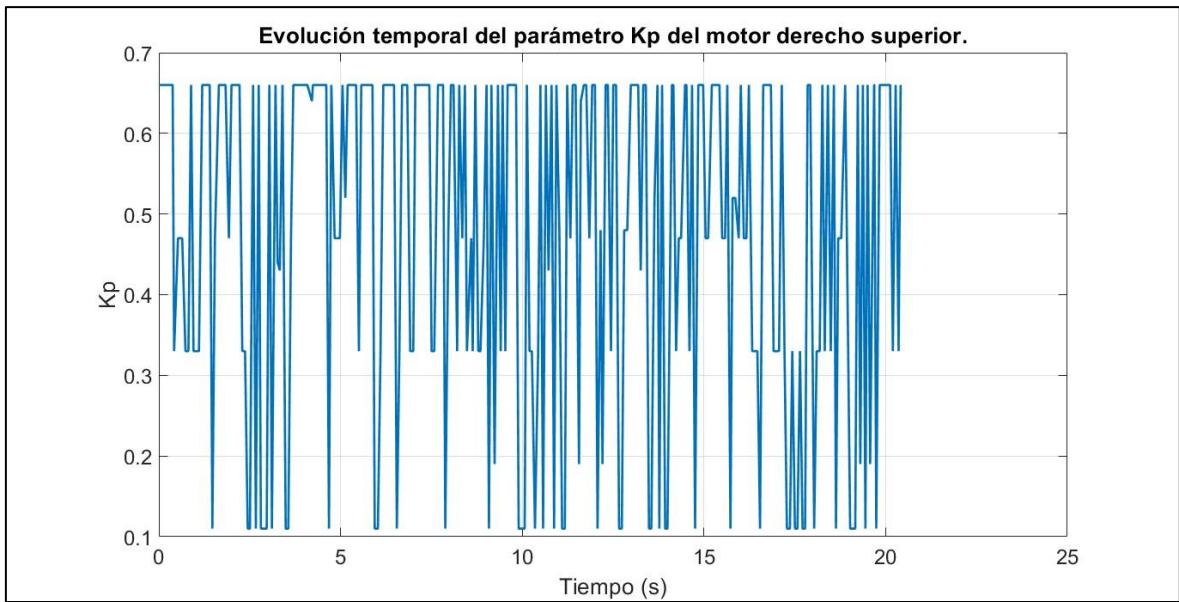
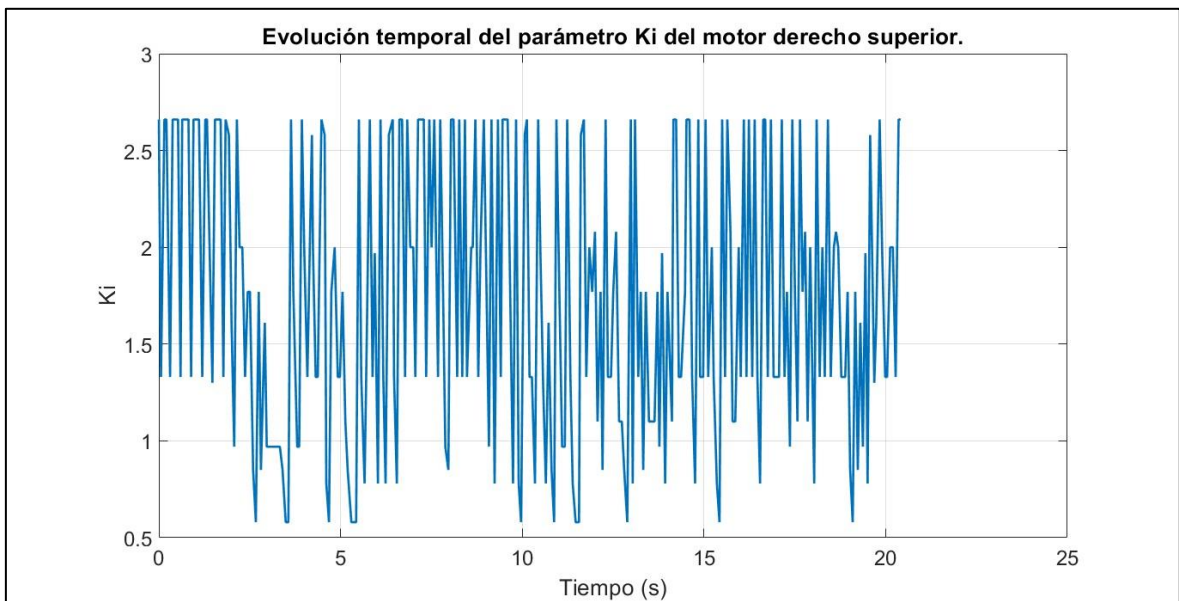


Gráfico 91. Curva de respuesta del control de velocidad del motor derecho superior.



*Gráfico 92. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.*



*Gráfico 93. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.*

- Motor derecho inferior

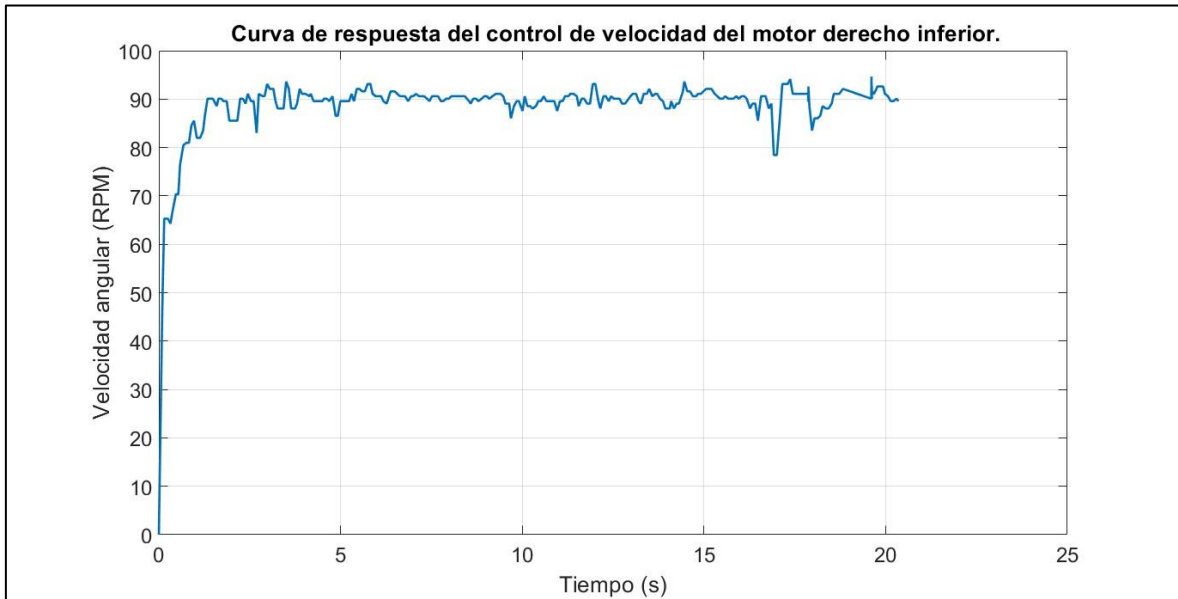


Gráfico 94. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

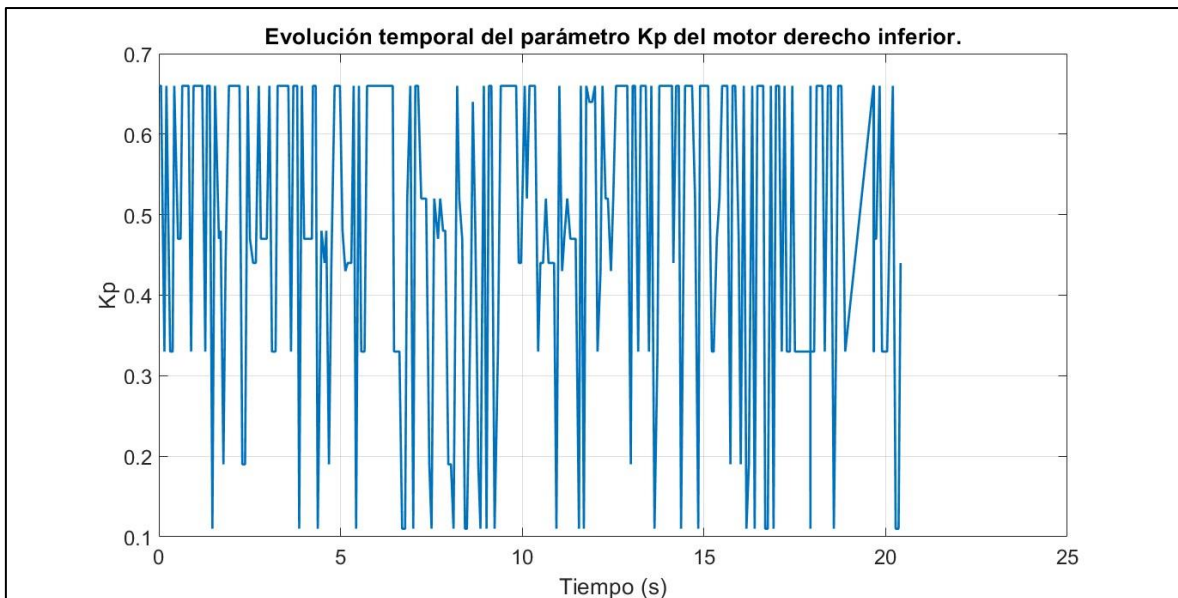


Gráfico 95. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

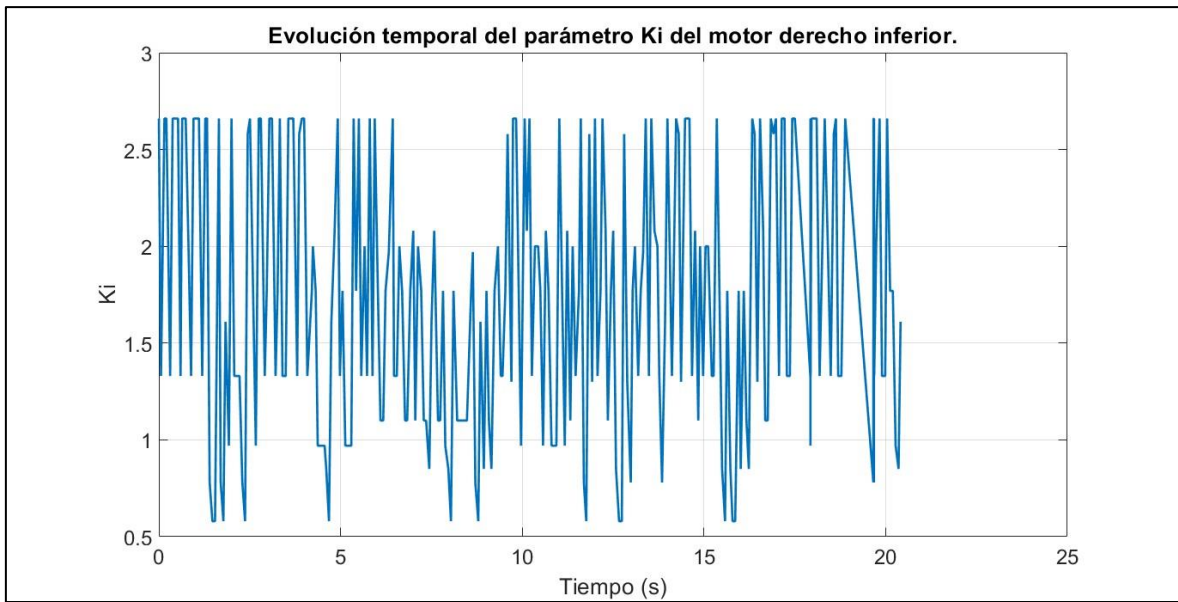


Gráfico 96. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

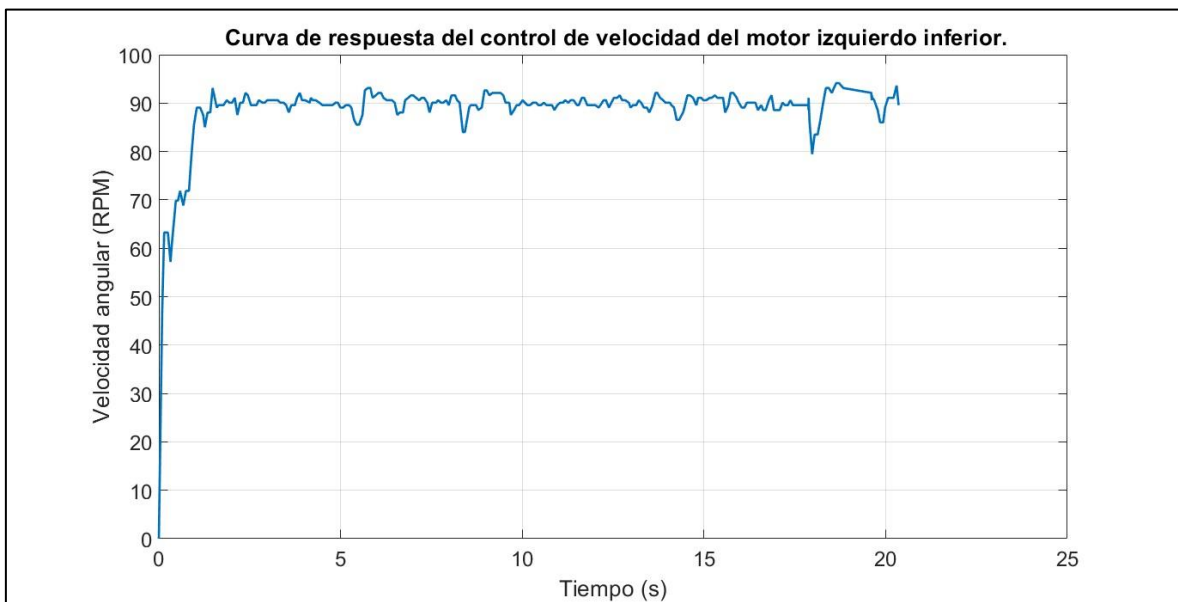


Gráfico 97. Curva de respuesta del control de velocidad del motor izquierdo inferior.

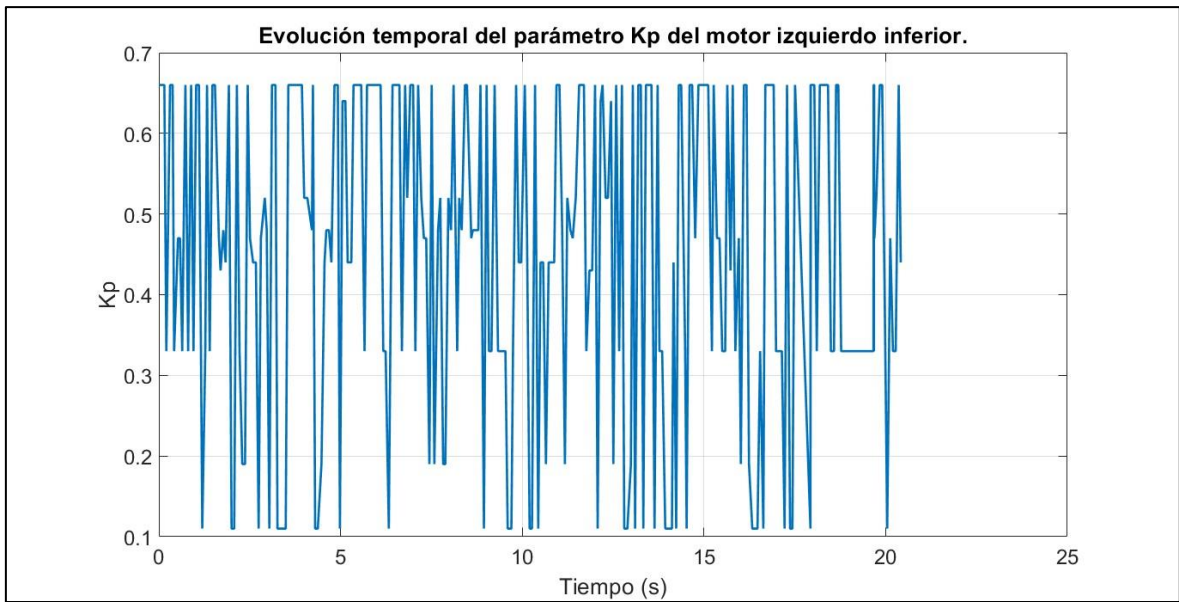


Gráfico 98. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

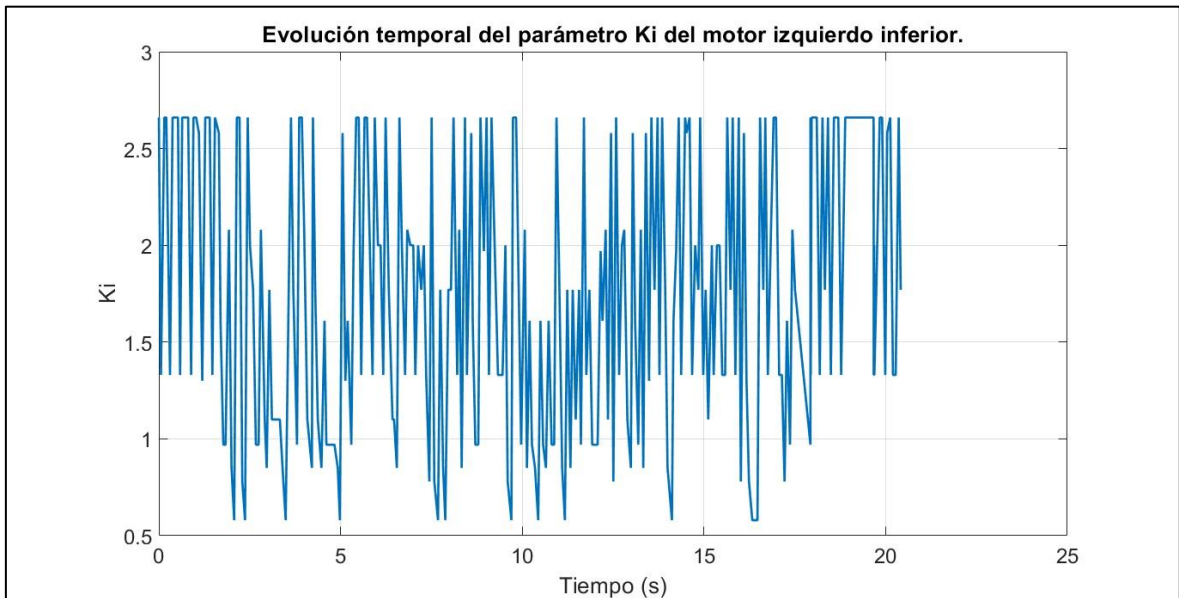


Gráfico 99. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

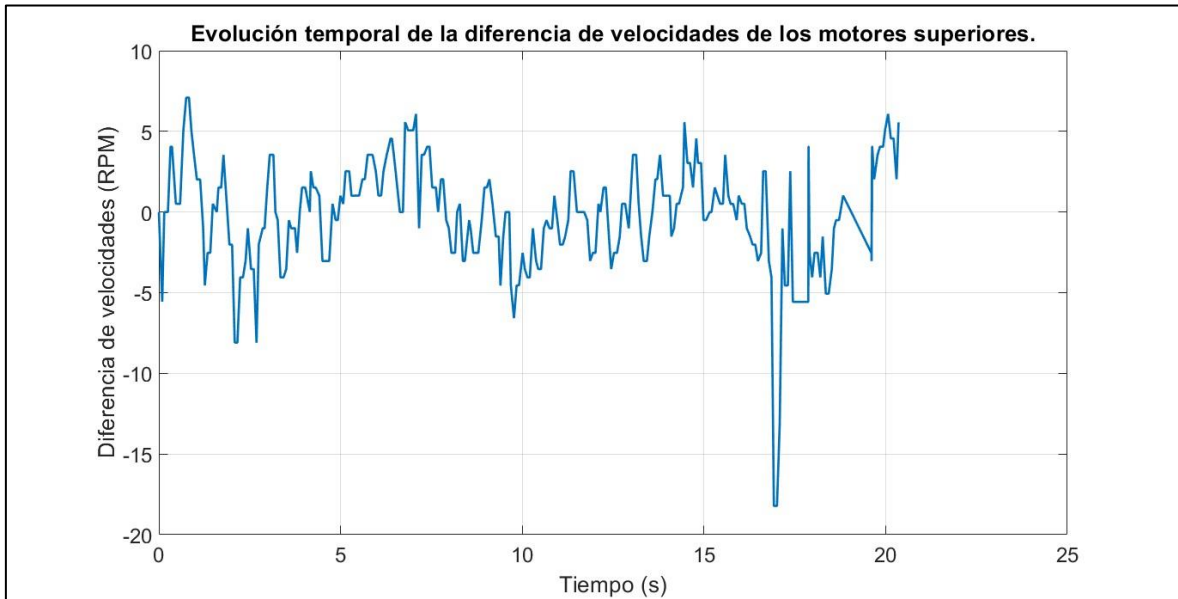


Gráfico 100. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

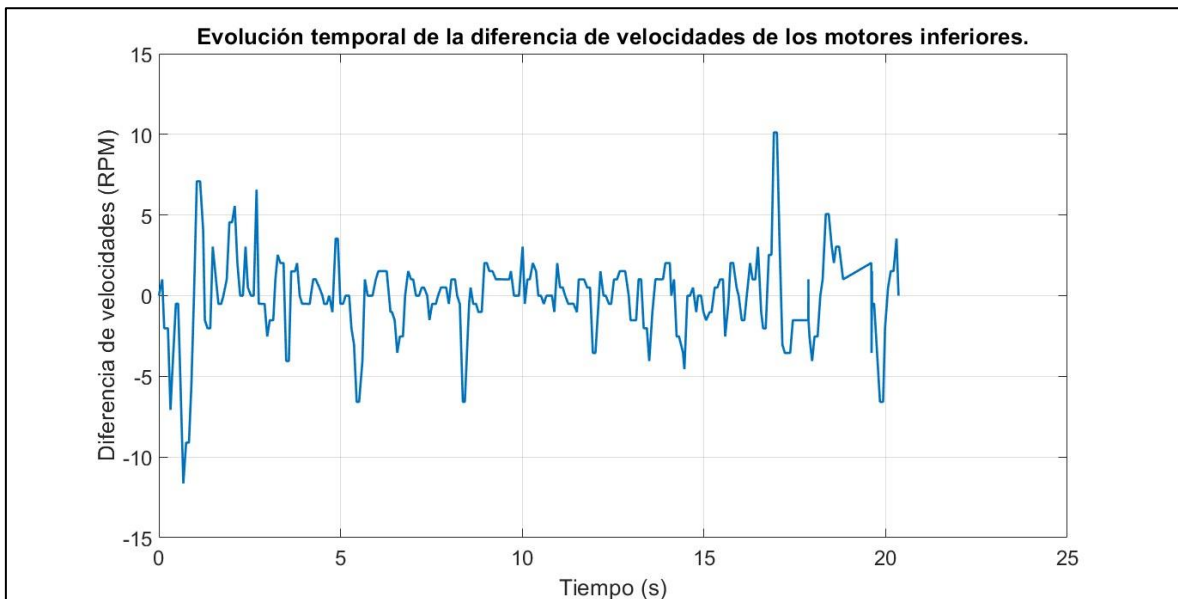


Gráfico 101. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=90 RPM, N° zonas=3										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	$\Delta w$ prom (RPM)
MOTOR 1	1.265	0.092	0.749	1.869	5.156	2.133	2.37	0.495	1.938	-0.156
MOTOR 2	1.137	0.093	0.968	2.089	4.589	1.242	1.38	0.478	1.727	
MOTOR 3	1.266	0.093	0.828	1.415	5.156	1.321	1.467	0.49	1.739	-0.152
MOTOR 4	1.266	0.092	0.895	1.48	4.589	1.213	1.348	0.463	1.734	
Promedio	1.234	0.093	0.860	1.713	4.873	1.477	1.641	0.482	1.785	

Tabla 24. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 90 RPM y autosintonizados para 3 zonas.

b) Velocidad general de robot diferencial.

- Setpoint de 16.336 cm/s

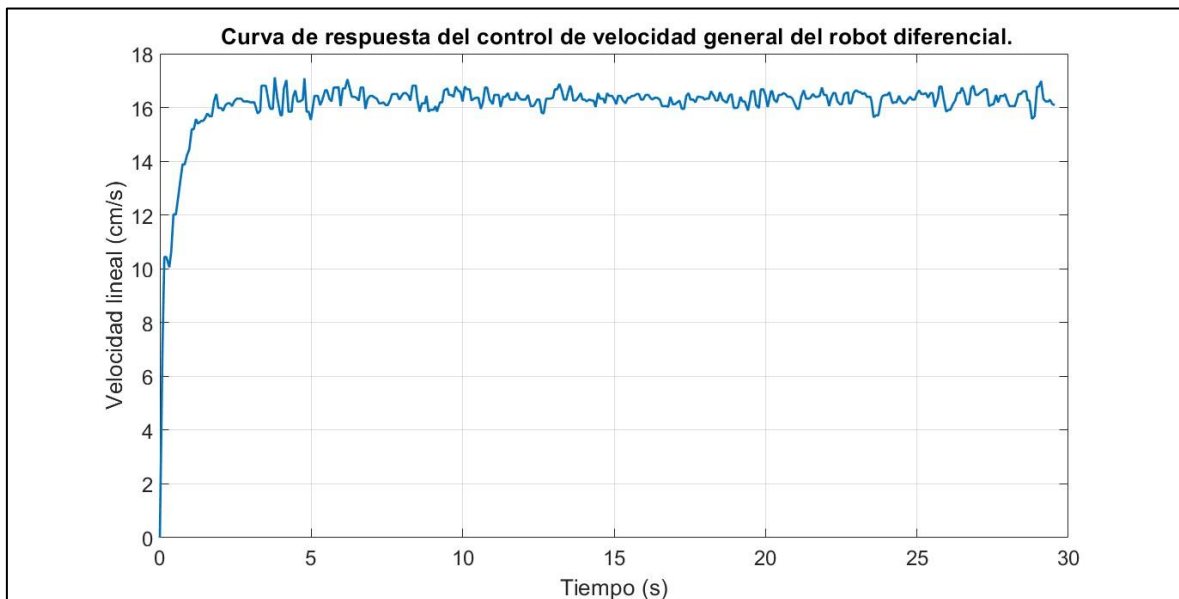


Gráfico 102. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 16.336 cm/s.

- Setpoint de 19.059 cm/s

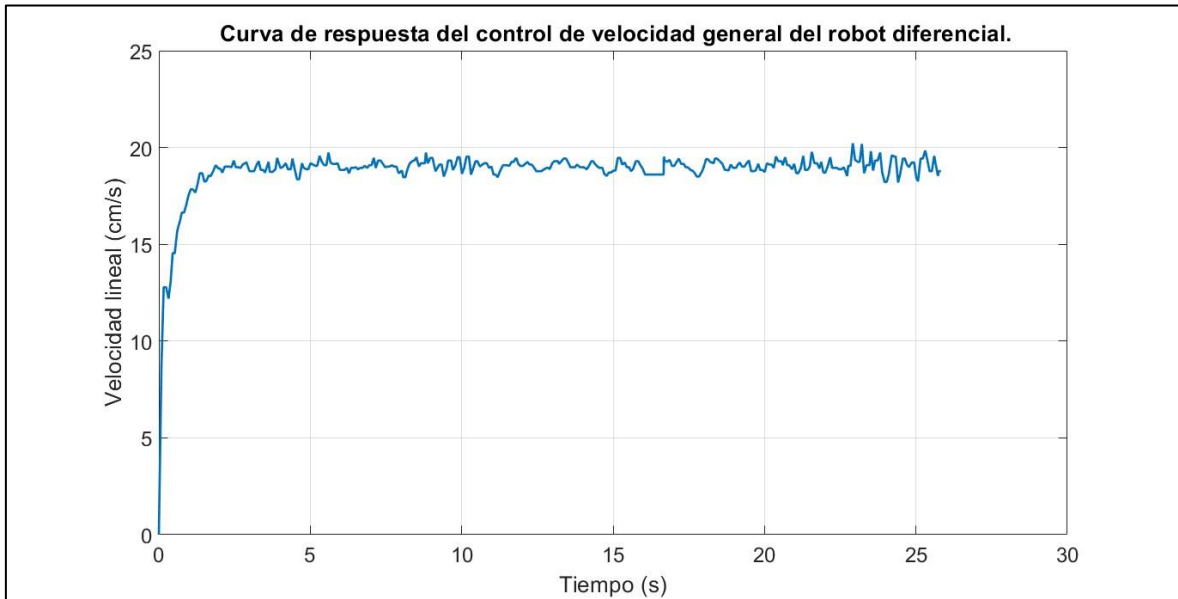


Gráfico 103. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 19.059 cm/s.

- Setpoint de 21.782 cm/s

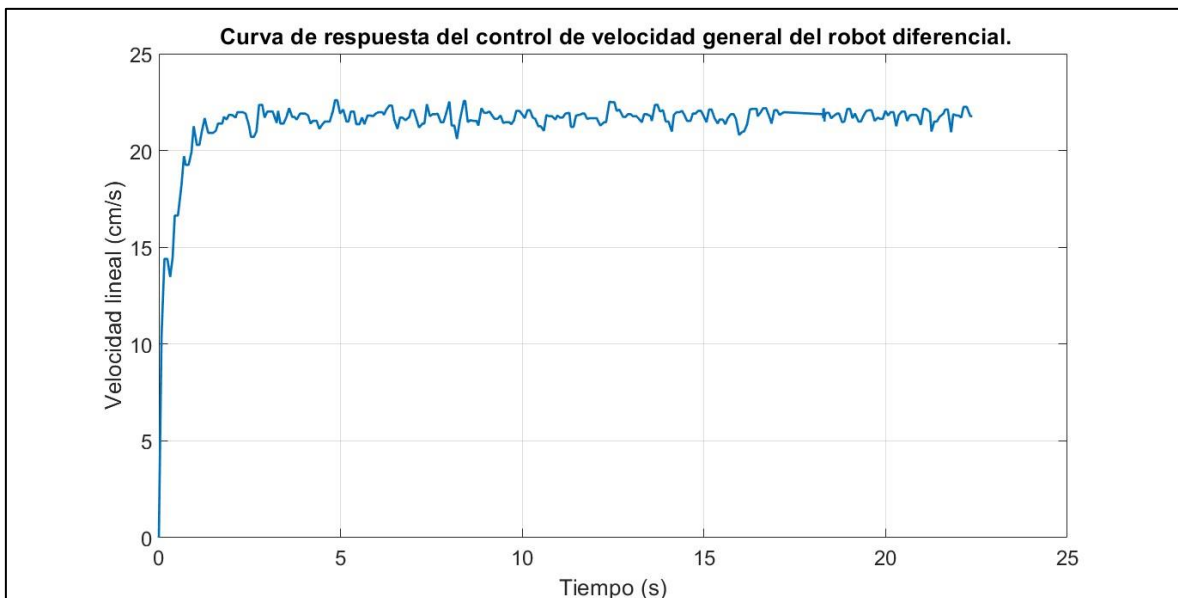


Gráfico 104. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 21.782 cm/s.



- Setpoint de 24.502 cm/s

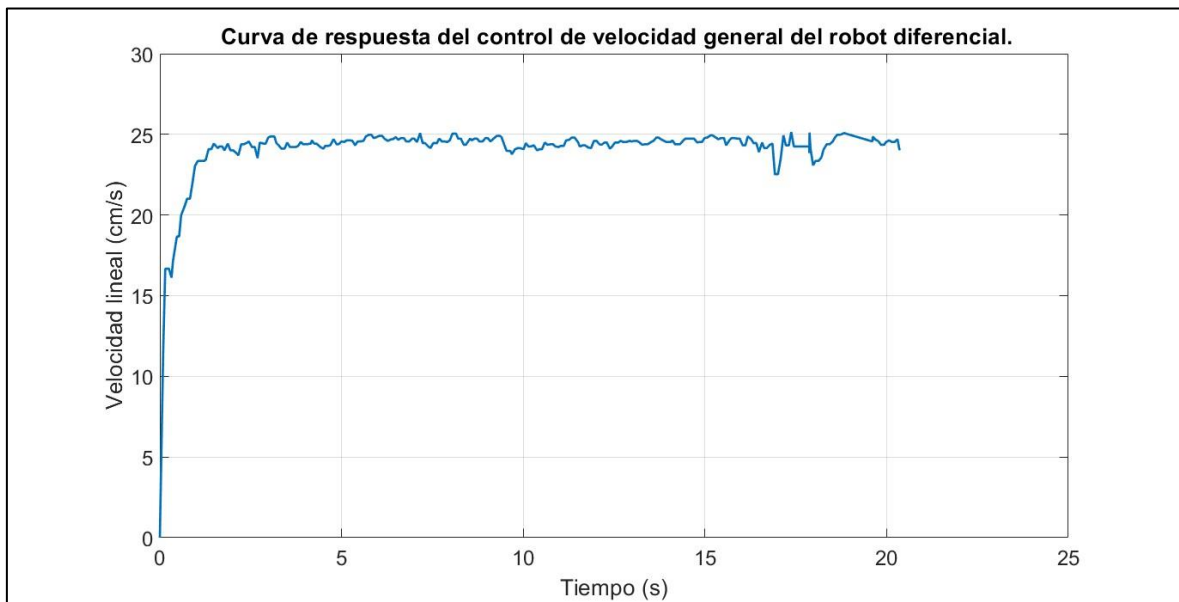


Gráfico 105. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 24.504 cm/s.

- Características en el dominio del tiempo

Nº zonas=3									
Velocidad lineal (cm/s)	Velocidad por motor	Ts (s)	Tr(s)	Tsub(s)	Tp(s)	Mp (%)	Ess prom (cm/s)	% Ess prom	θ prom (rad/s)
16.336	60 RPM	1.421	0.089	0.971	1.864	4.799	0.2123	1.299	0.0021
19.059	70 RPM	1.352	0.086	0.903	1.876	6.092	0.24	1.256	0.0011
21.782	80 RPM	1.182	0.074	0.691	1.928	3.742	0.277	1.273	-0.0017
24.504	90 RPM	1.045	0.093	0.895	1.484	2.6212	0.268	1.094	-0.0042

Tabla 25. Características en el dominio del tiempo de la velocidad general del robot diferencial autosintonizado con 3 zonas.

#### 4.2.2. Sistema de autosintonización de 5 zonas.

##### a) Setpoint por motor de 60 RPM

- Motor izquierdo superior

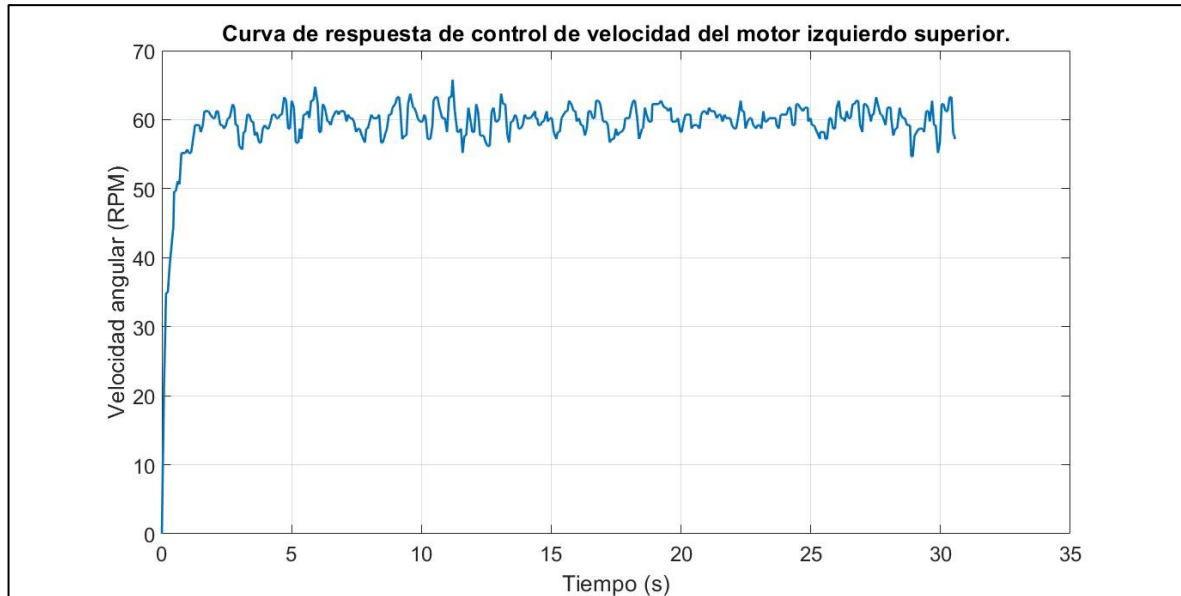


Gráfico 106. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.

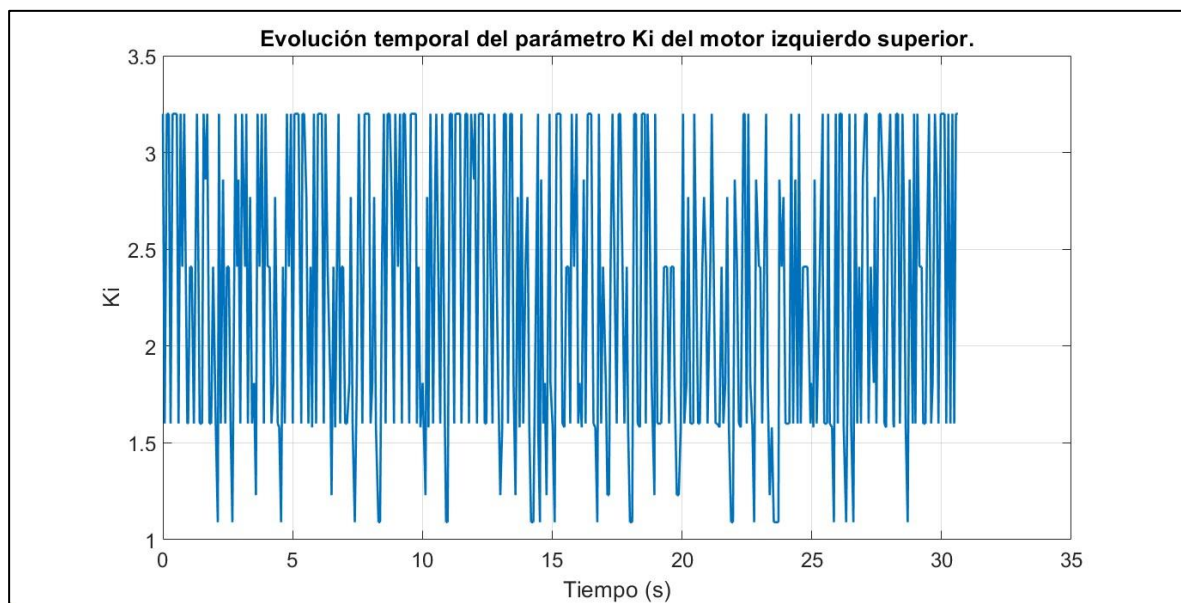


Gráfico 107. Evolución temporal del parámetro Ki del motor izquierdo superior.

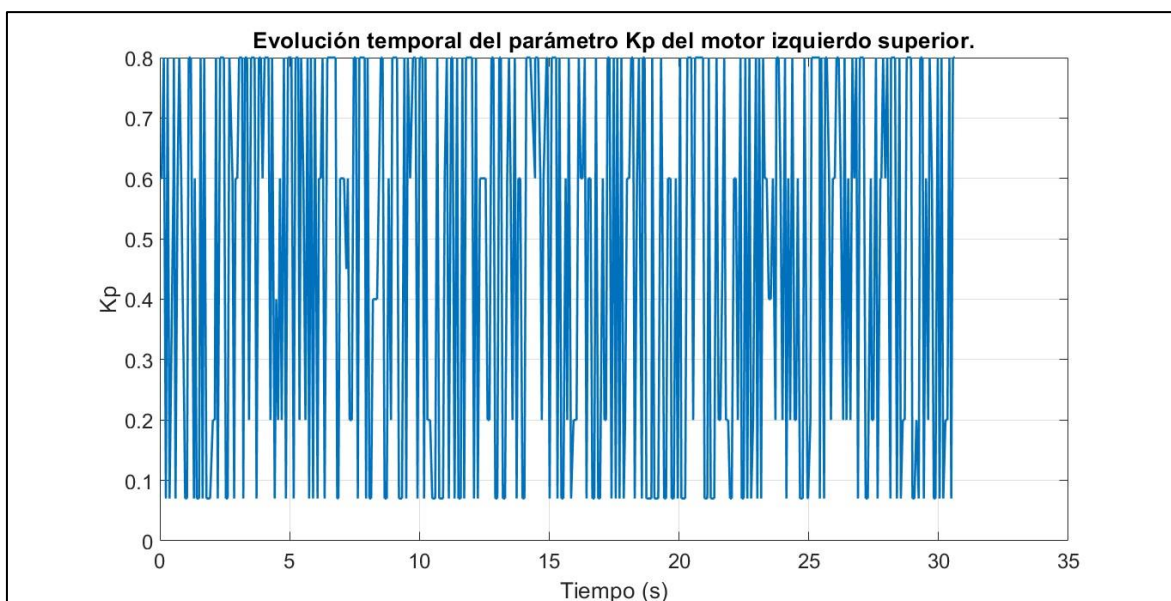


Gráfico 108. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.

- Motor derecho superior

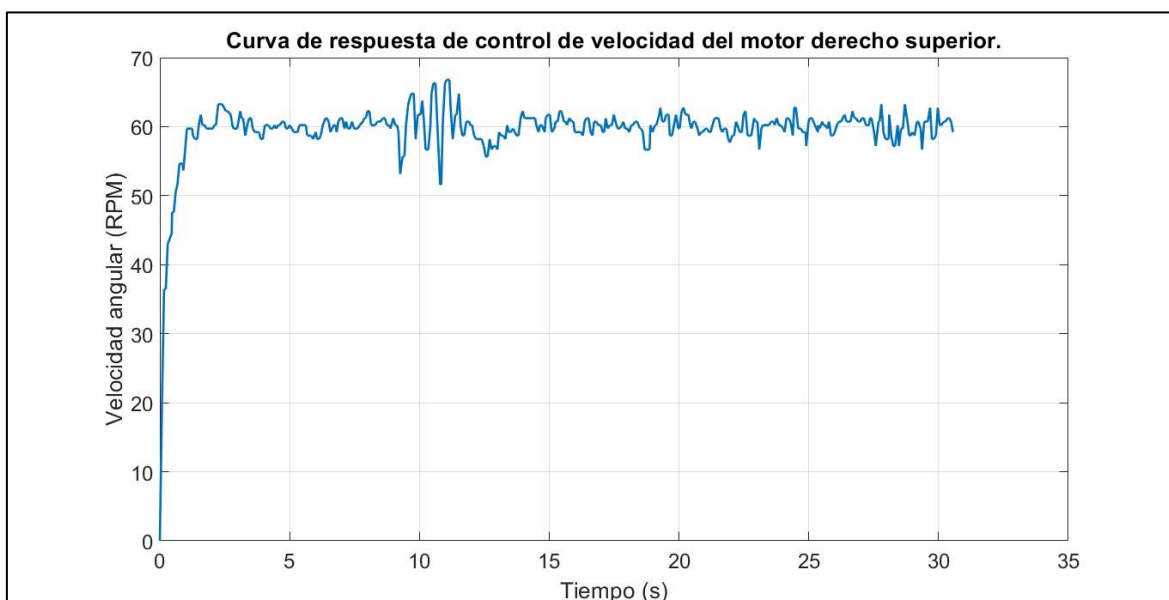
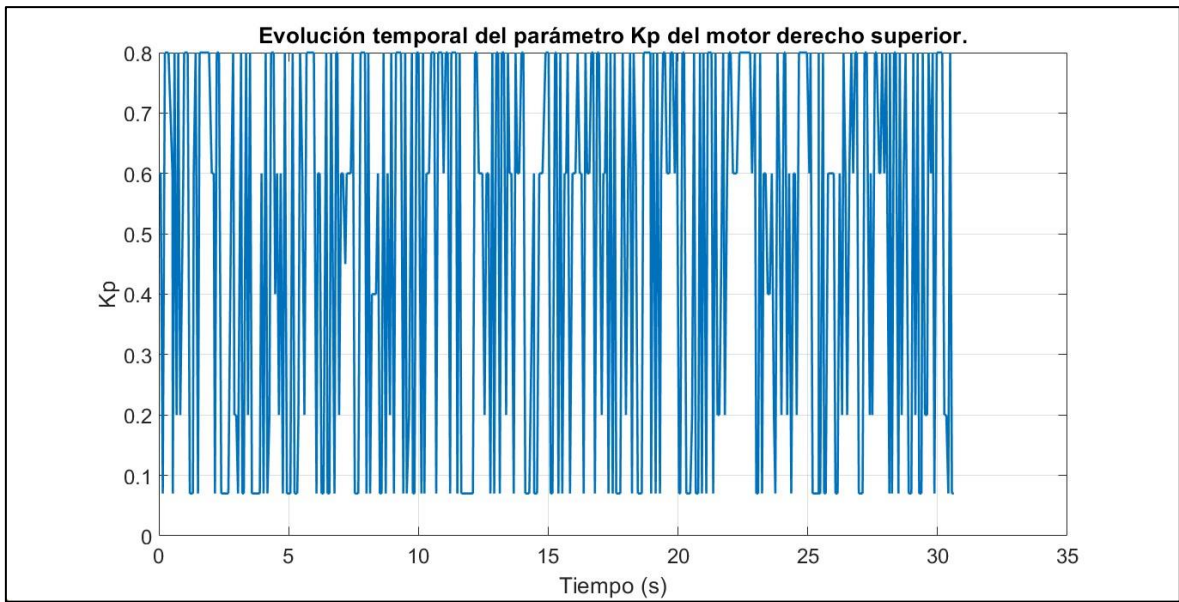
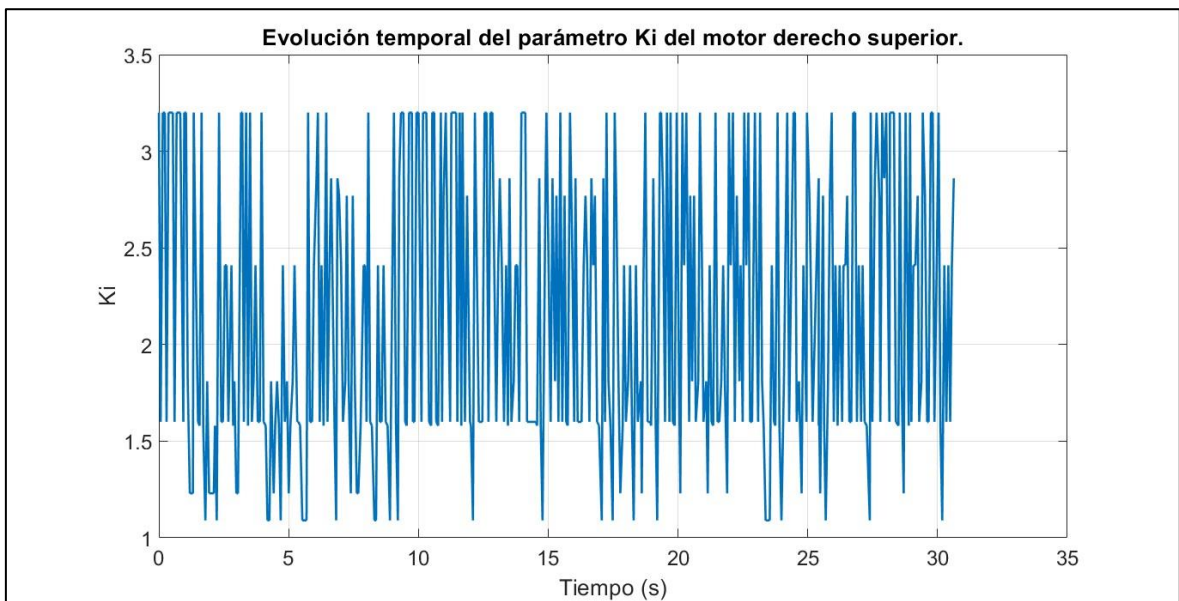


Gráfico 109. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.



*Gráfico 110. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.*



*Gráfico 111. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.*

- Motor derecho inferior

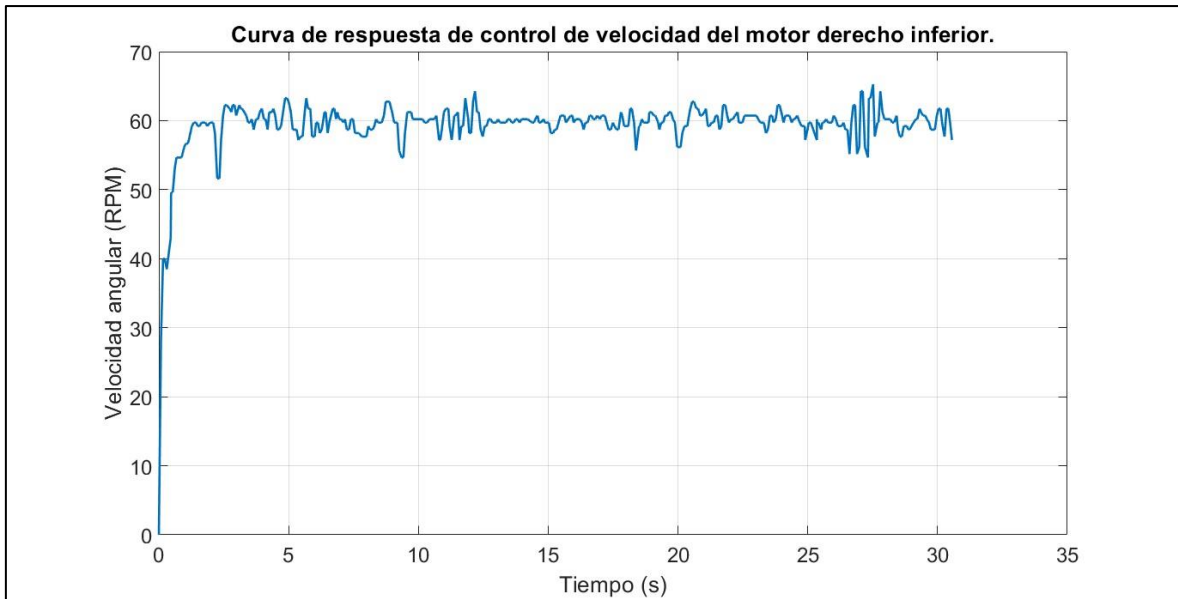


Gráfico 112. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

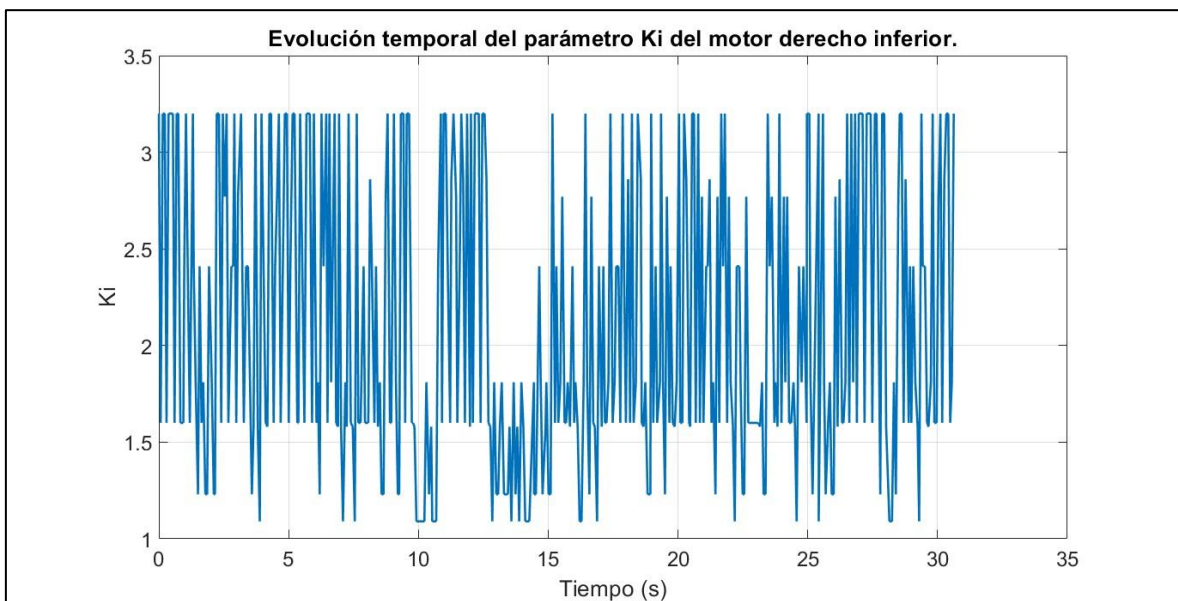


Gráfico 113. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

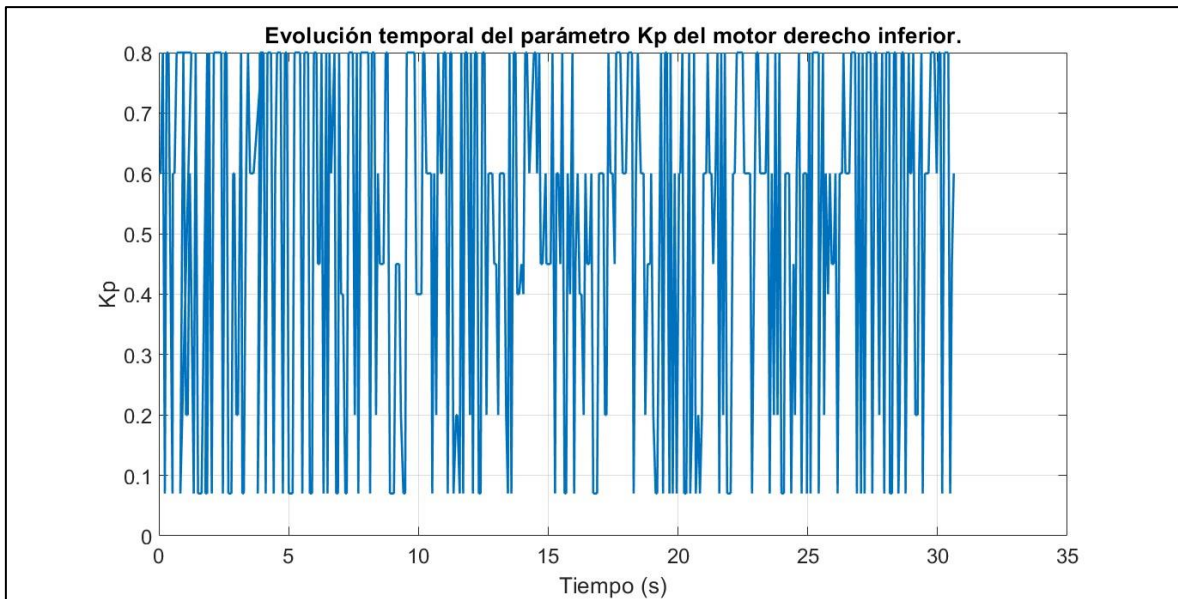


Gráfico 114. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

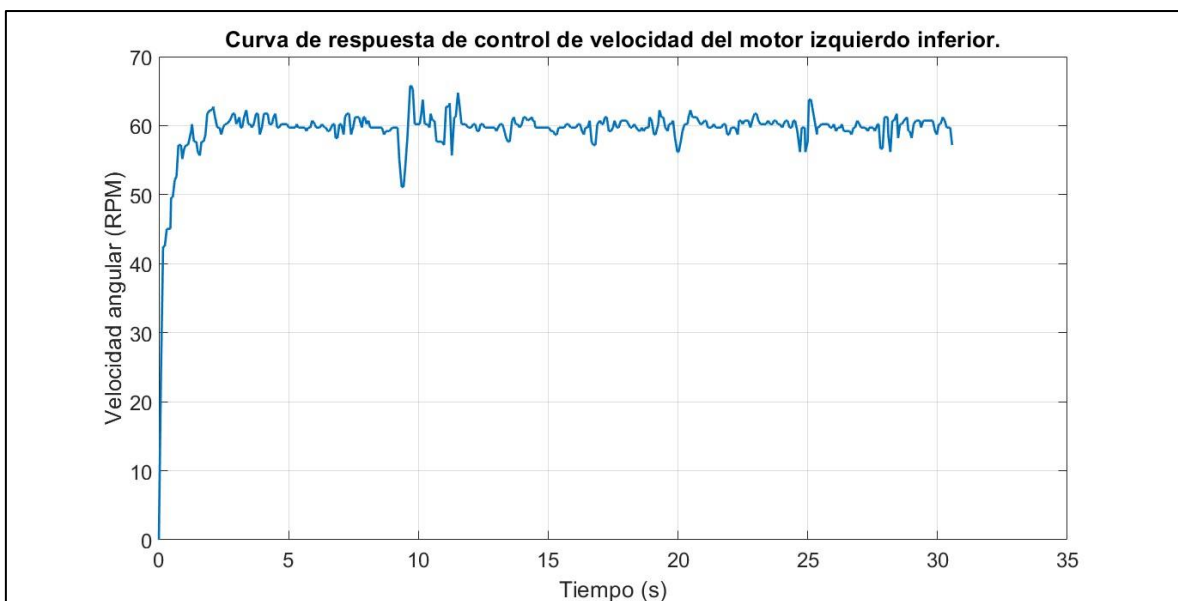
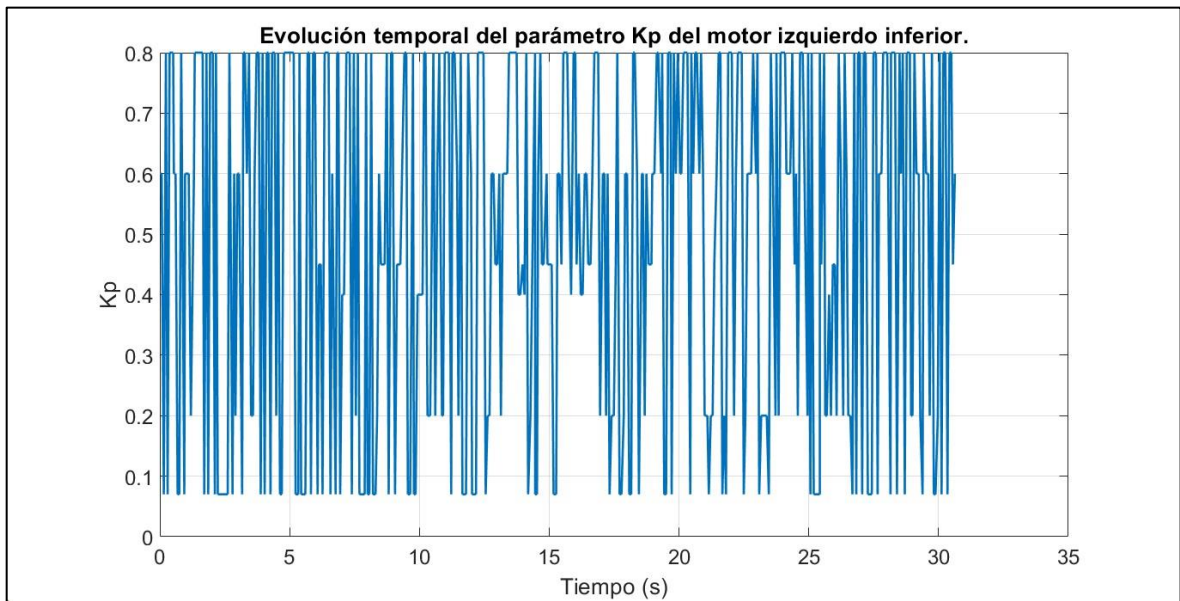
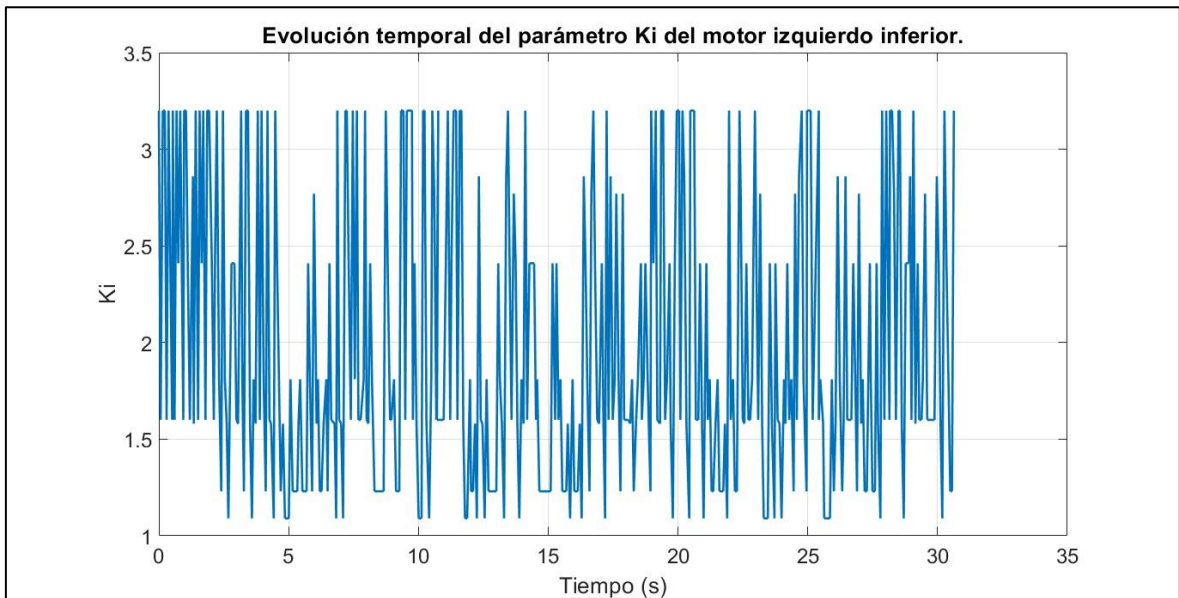


Gráfico 115. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.



*Gráfico 116. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.*



*Gráfico 117. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.*

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

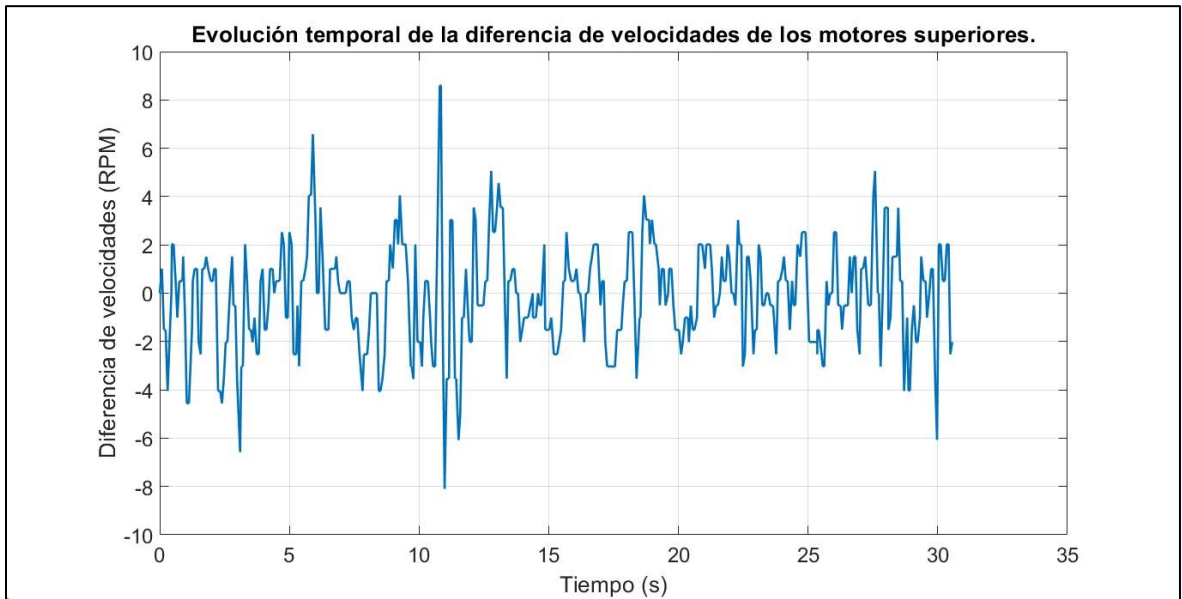


Gráfico 118. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

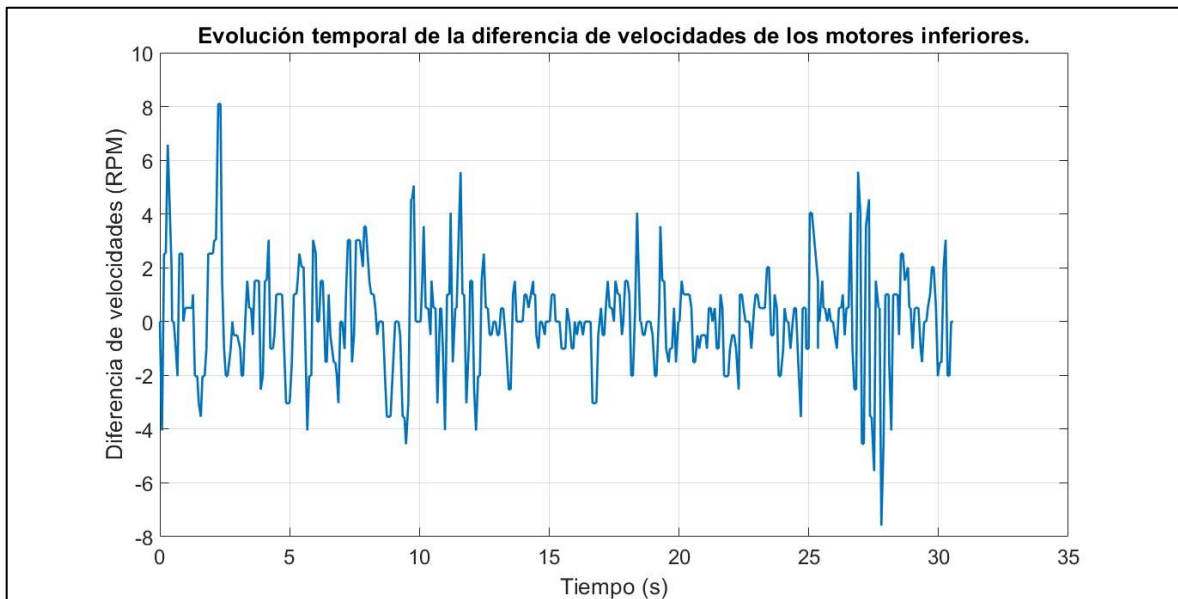


Gráfico 119. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.



- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=60 RPM, N° zonas=5										
	T <sub>s</sub> (s)	T <sub>r</sub> (s)	T <sub>sub</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	M <sub>p</sub> (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	K <sub>p</sub> prom	K <sub>i</sub> prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1	1.244	0.163	0.753	1.64	9.65	1.412	2.354	0.463	2.266	-0.135
MOTOR 2	0.976	0.162	0.755	1.578	11.33	1.241	2.069	0.481	2.15	
MOTOR 3	1.124	0.083	0.68	2.47	8.8	1.155	1.925	0.506	2.104	0.059
MOTOR 4	1.642	0.083	0.68	1.276	9.65	0.942	1.57	0.487	1.975	
Promedio	1.247	0.123	0.717	1.741	9.858	1.188	1.980	0.484	2.124	

Tabla 26. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 60RPM autosintonizados con 5 zonas.

b) Setpoint por motor de 70 RPM

- Motor izquierdo superior

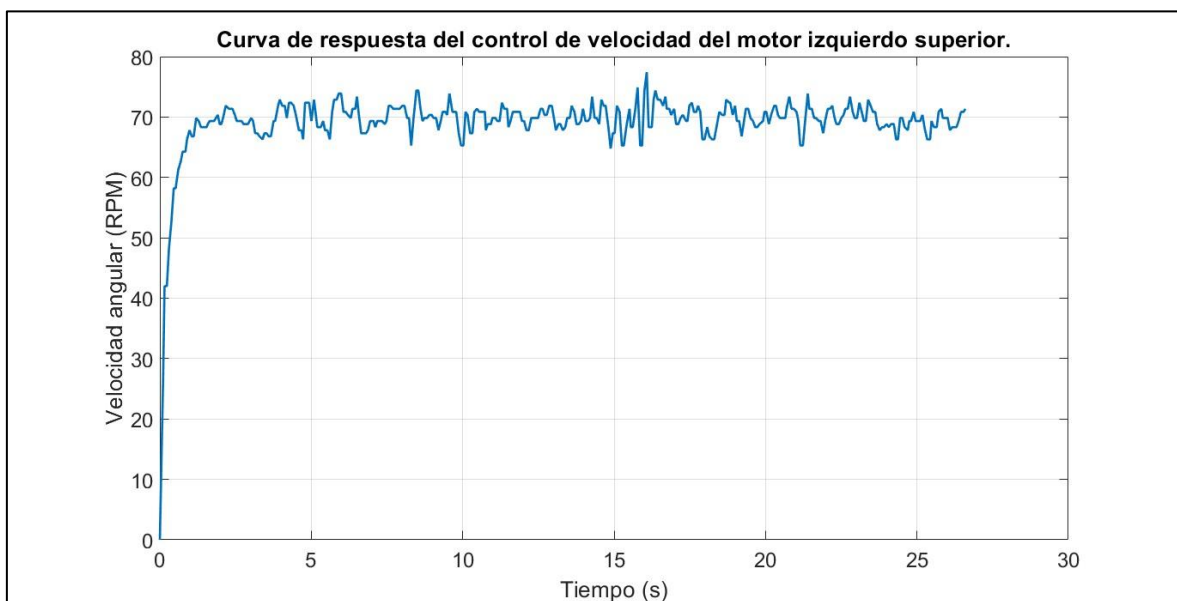
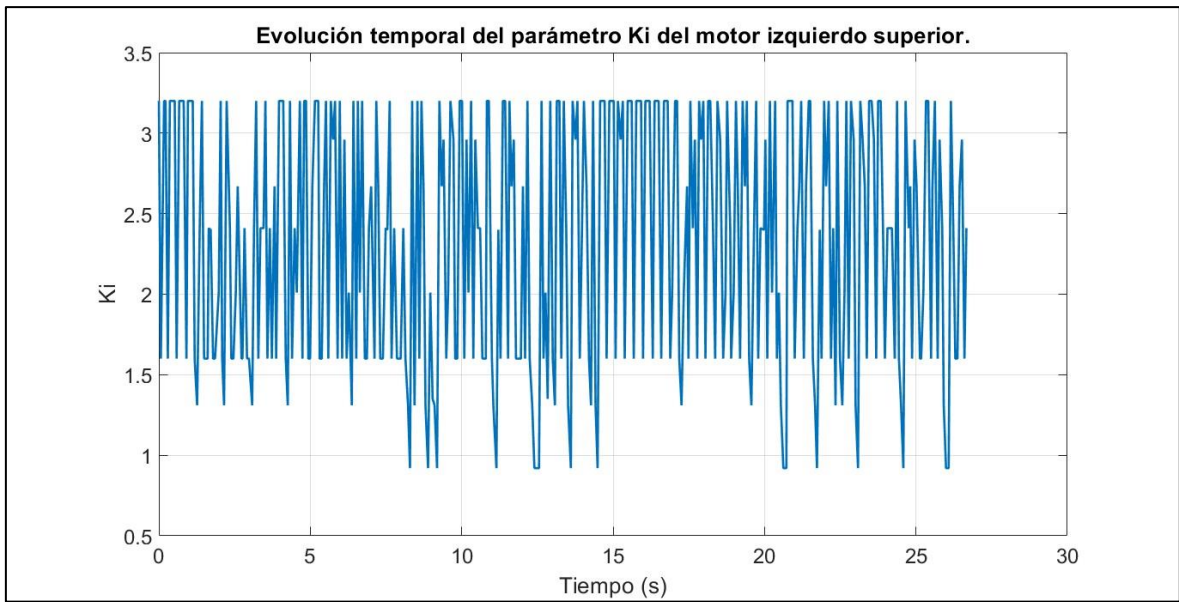
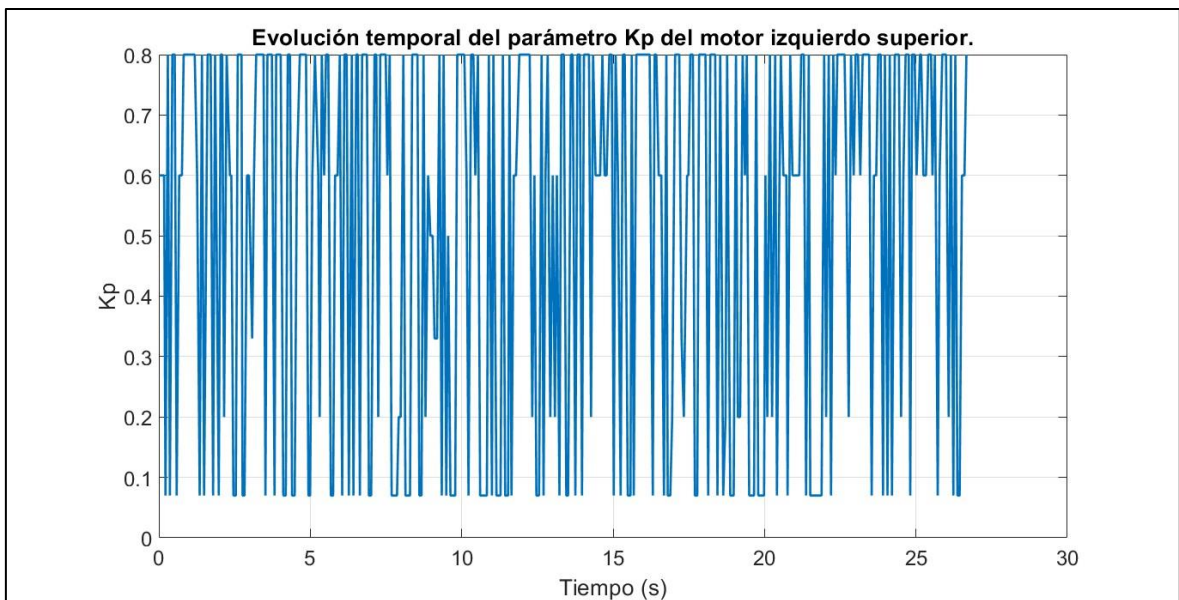


Gráfico 120. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.



*Gráfico 121. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.*



*Gráfico 122. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.*

- Motor derecho superior

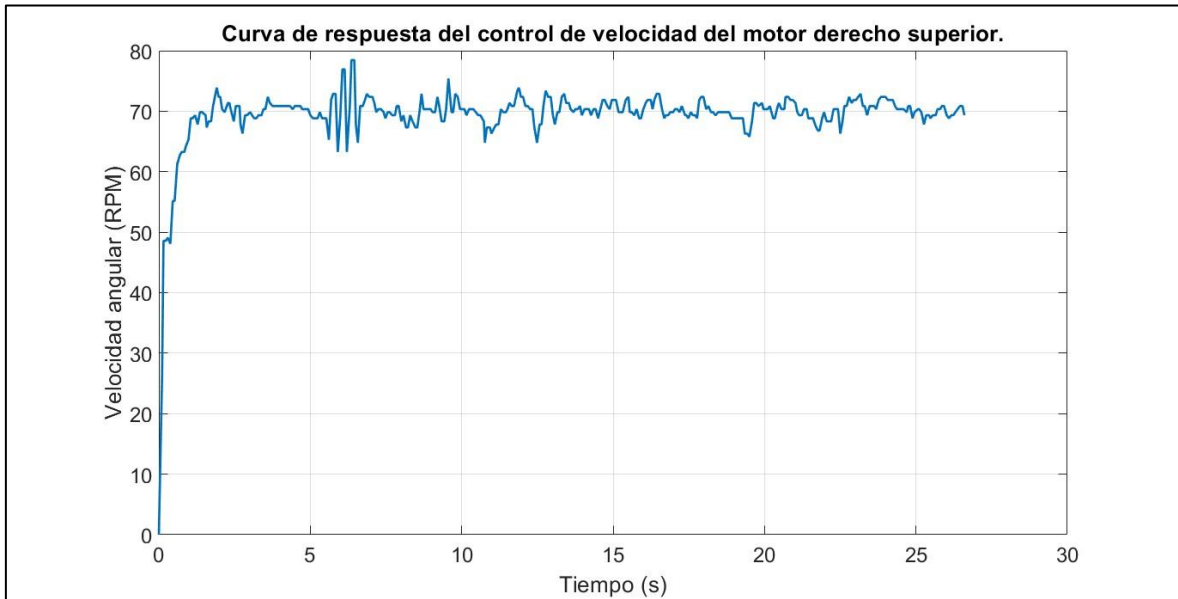


Gráfico 123. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

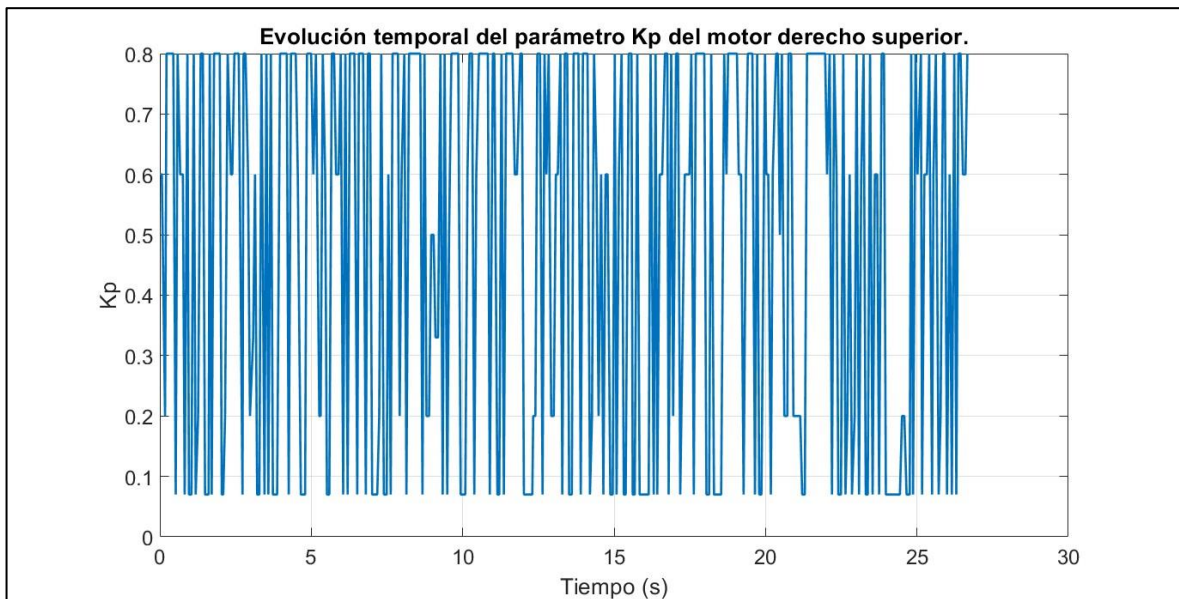


Gráfico 124. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

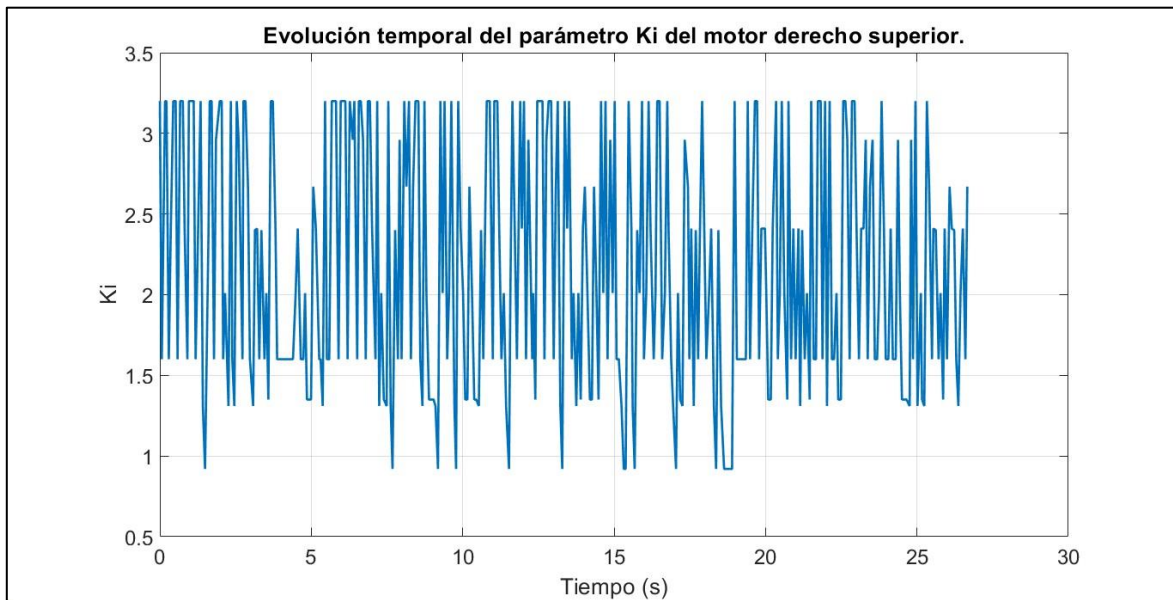


Gráfico 125. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

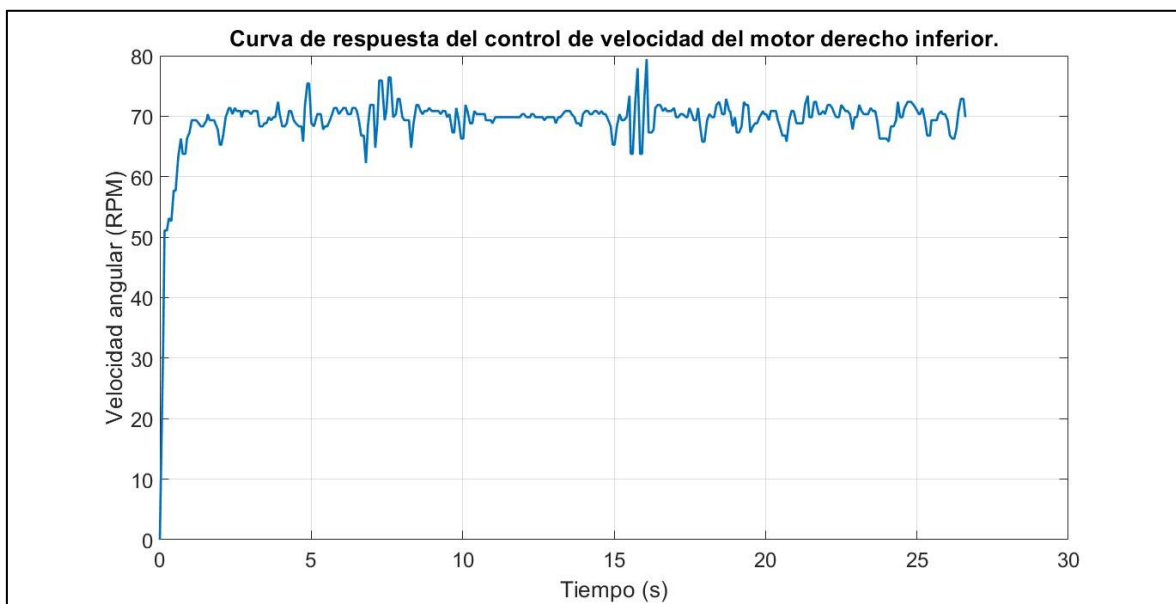


Gráfico 126. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

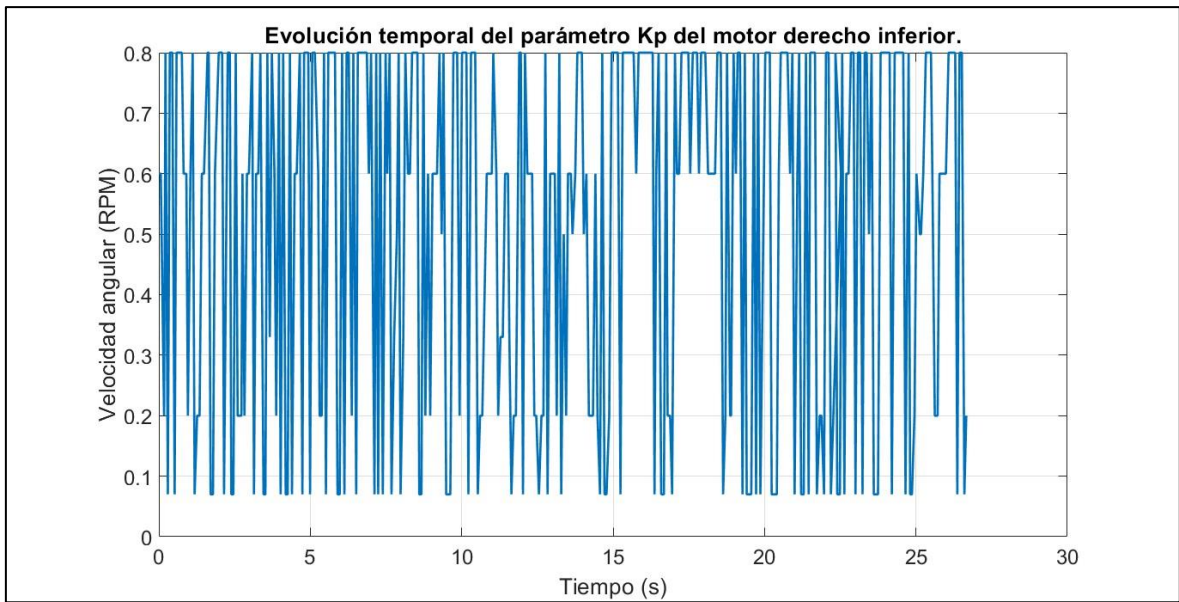


Gráfico 127. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

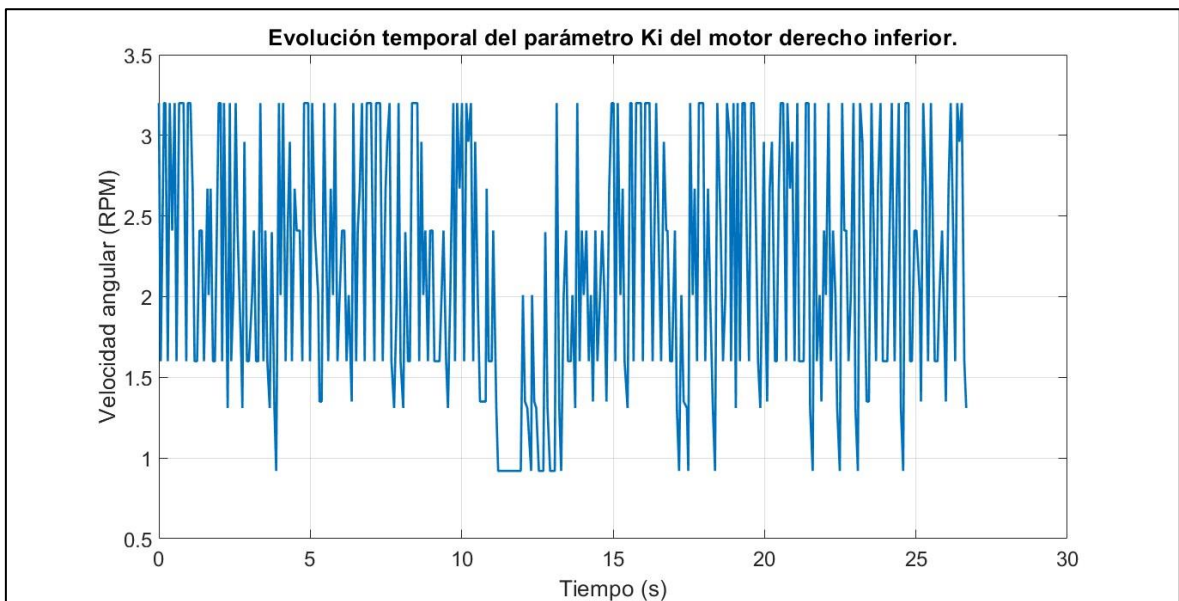


Gráfico 128. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

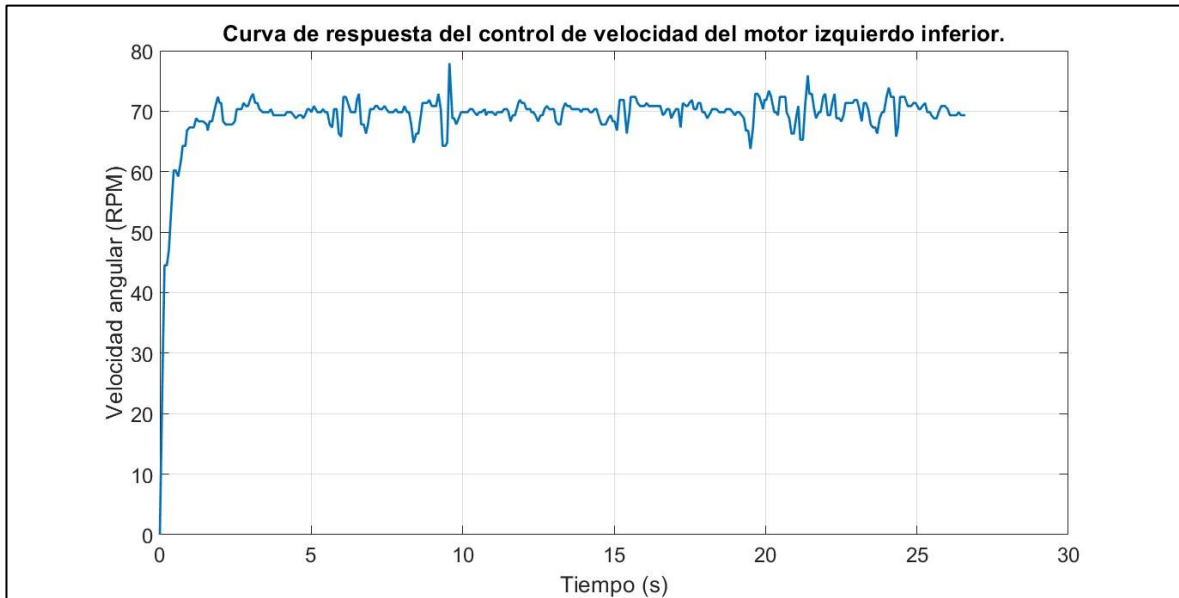


Gráfico 129. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

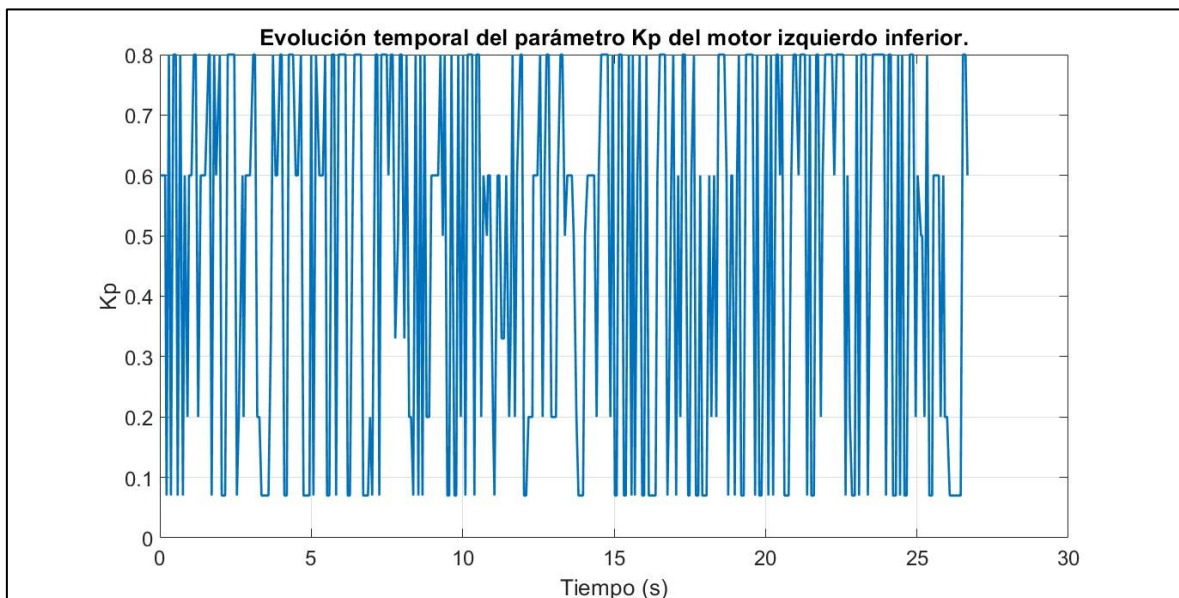


Gráfico 130. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

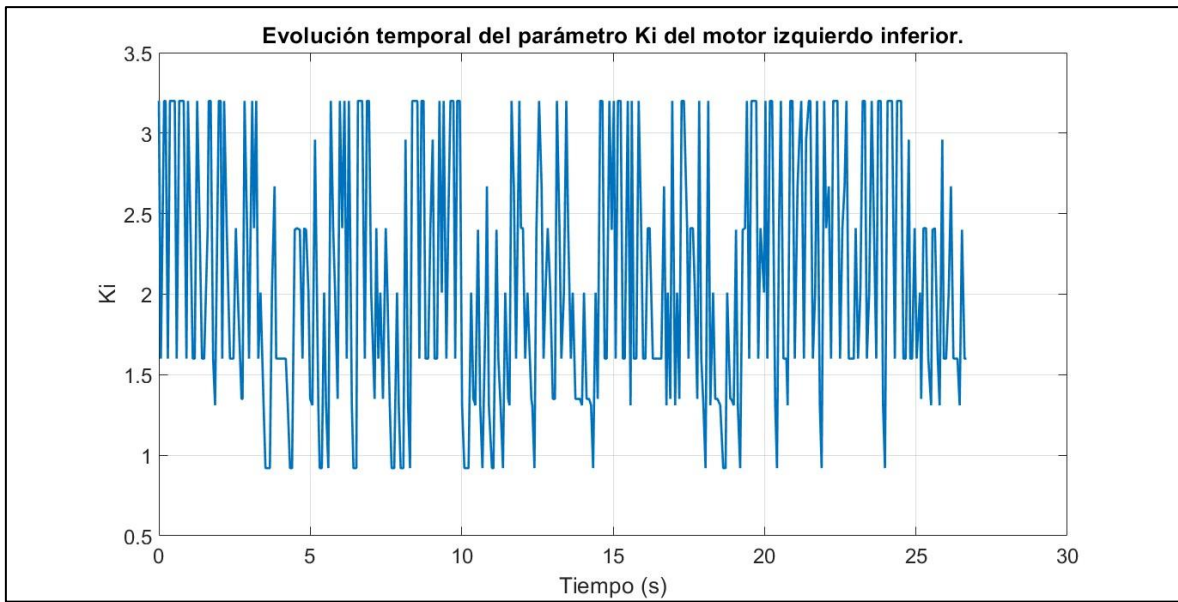


Gráfico 131. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

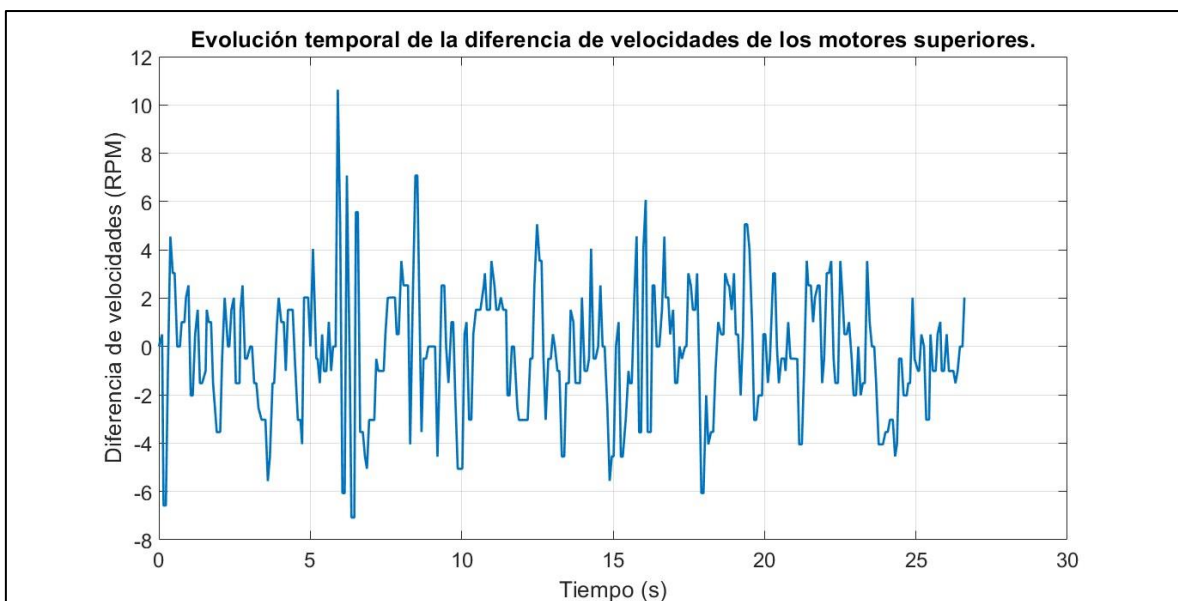


Gráfico 132. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

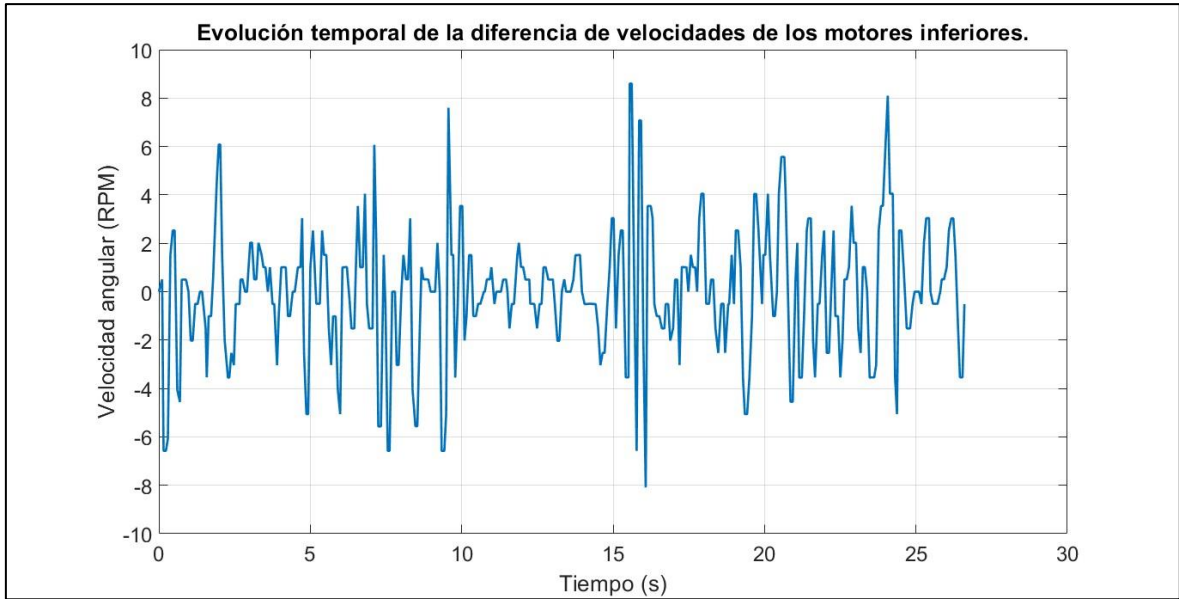


Gráfico 133. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=70 RPM, N° zonas=5										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	$\Delta w$ prom (RPM)
MOTOR 1	0.897	0.108	0.695	1.913	10.614	1.559	2.227	0.515	2.317	-0.26
MOTOR 2	0.978	0.107	0.695	1.913	12.057	1.311	1.873	0.485	2.167	
MOTOR 3	0.896	0.108	0.608	1.582	13.5	1.424	2.035	0.519	2.174	-0.03
MOTOR 4	0.896	0.108	0.695	1.913	11.343	1.253	1.79	0.480	2.088	
Promedio	0.917	0.108	0.673	1.830	11.879	1.387	1.981	0.500	2.187	

Tabla 27. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 70RPM autosintonizados con 5 zonas.



c) Setpoint por motor de 80 RPM

- Motor izquierdo superior

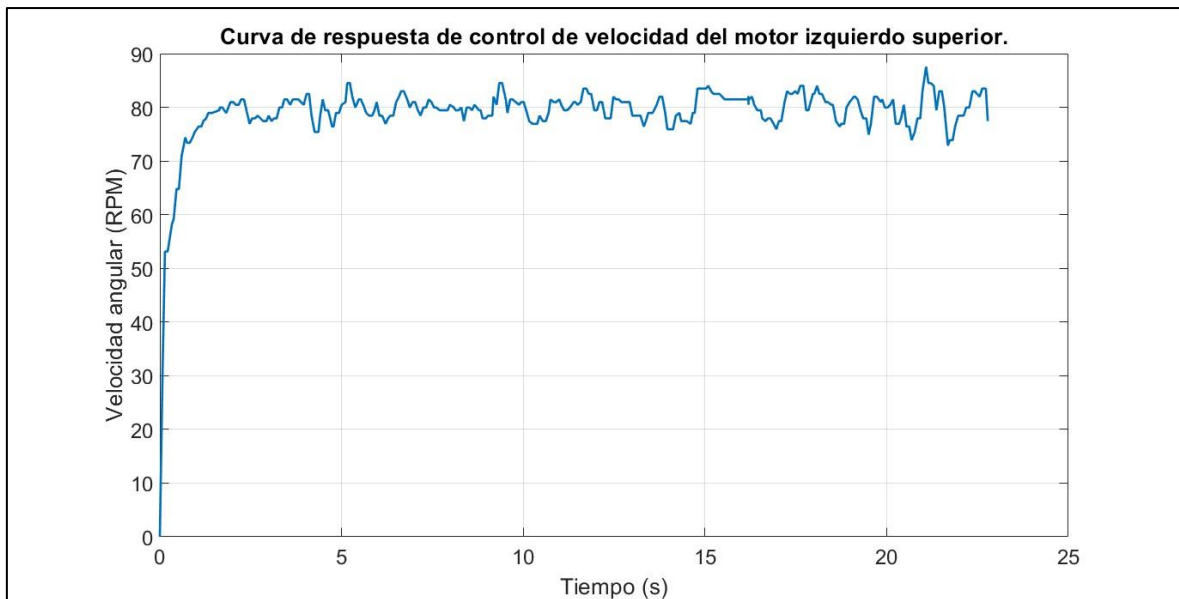


Gráfico 134. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.

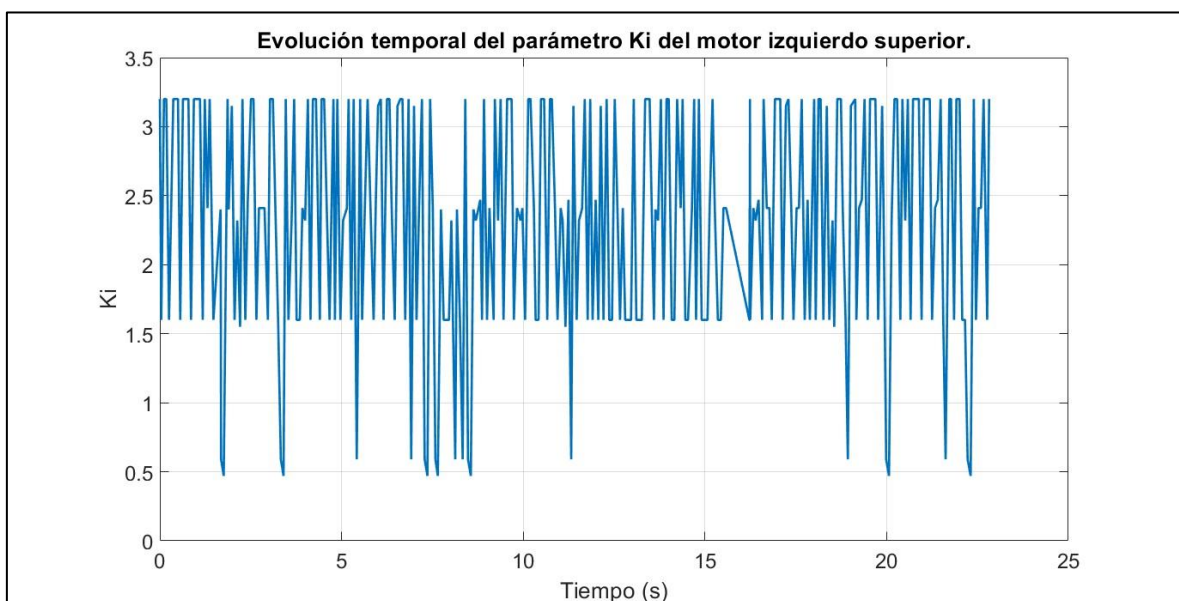


Gráfico 135. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.

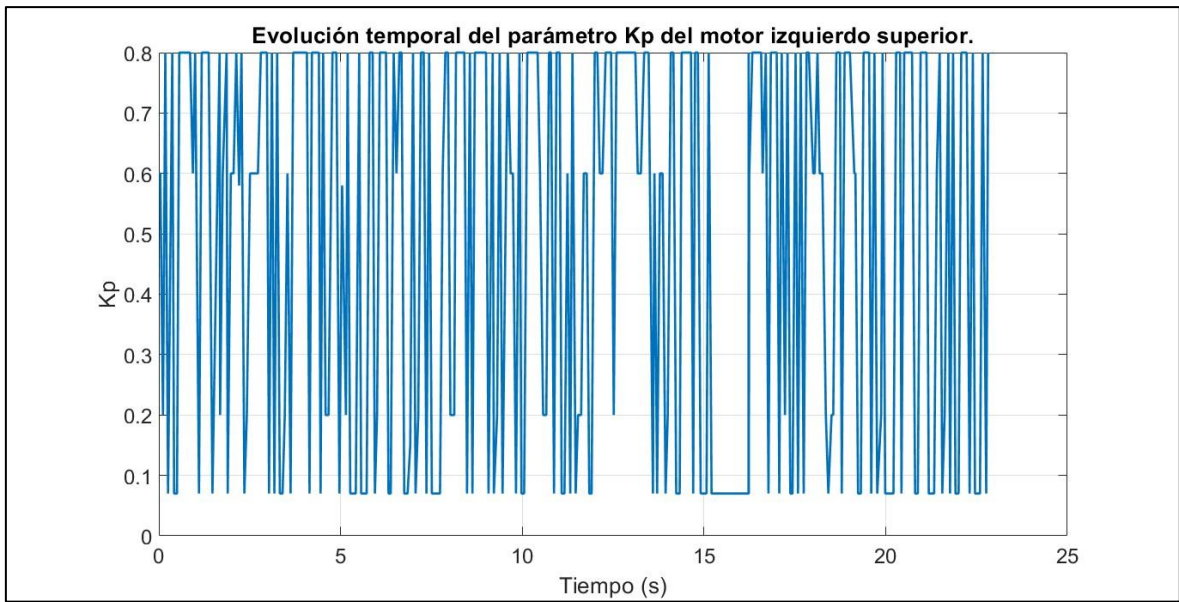


Gráfico 136. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.

- Motor derecho superior

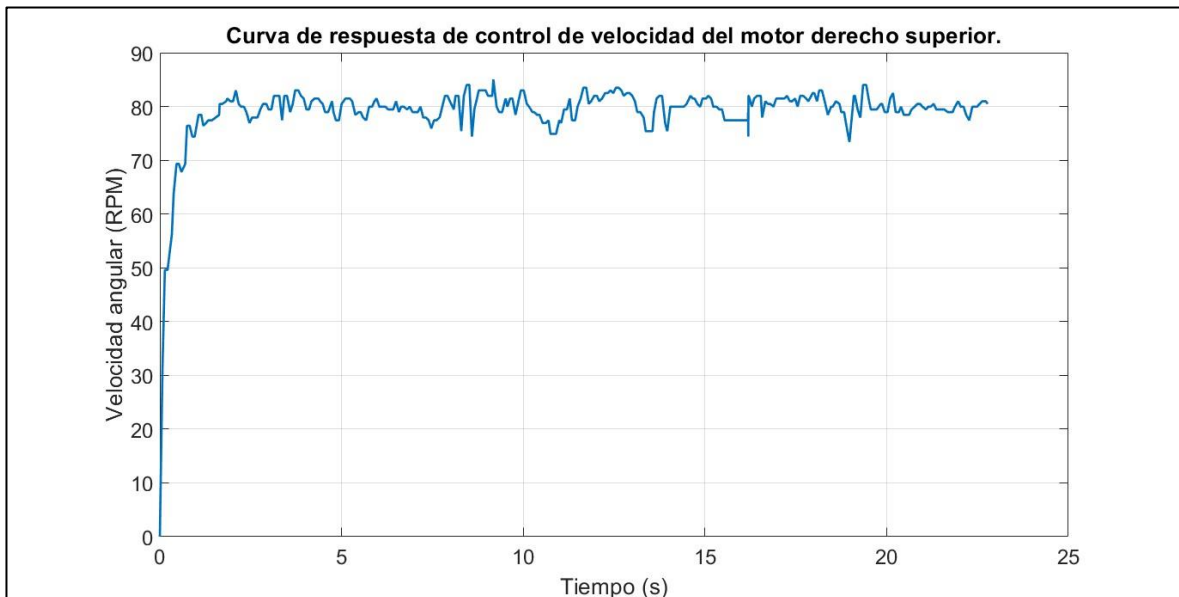
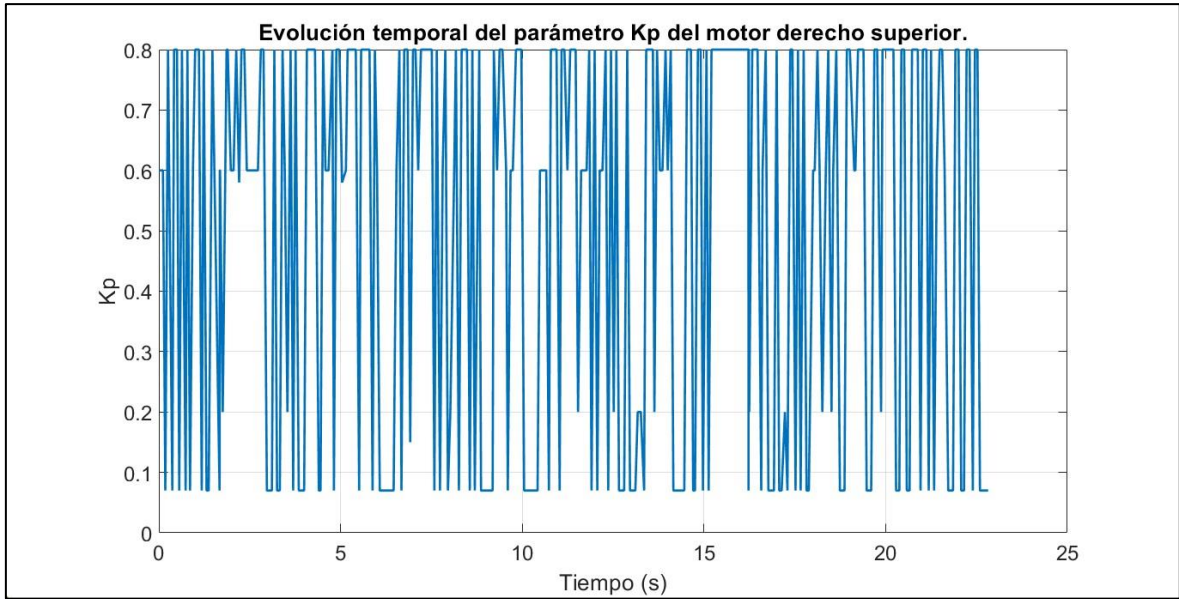
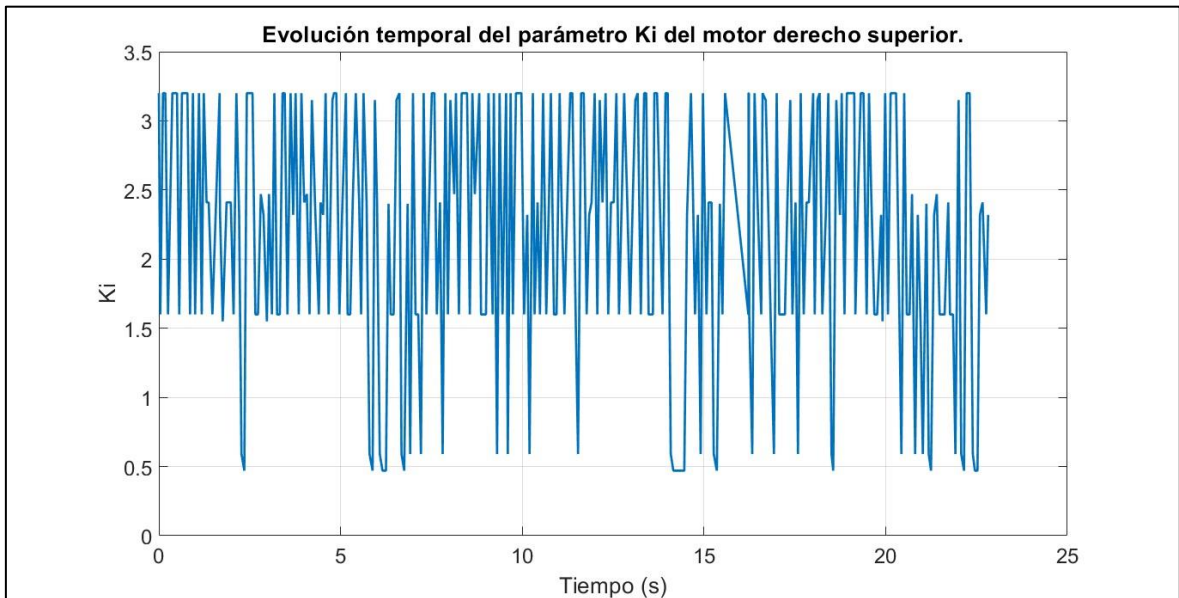


Gráfico 137. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.



*Gráfico 138. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.*



*Gráfico 139. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.*

- Motor derecho inferior

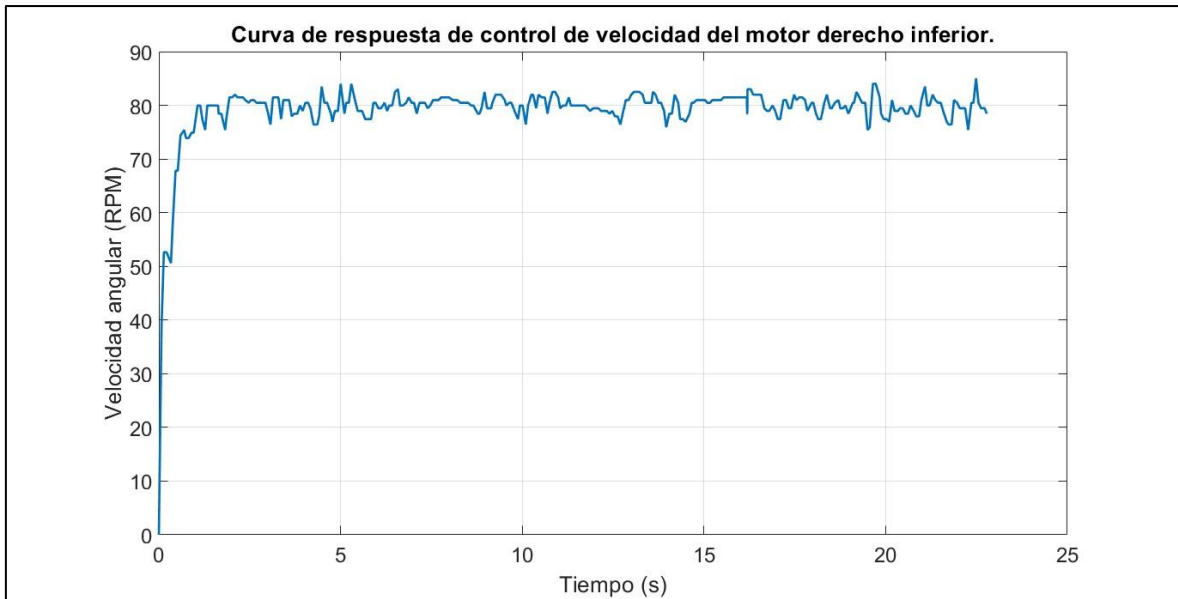


Gráfico 140. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

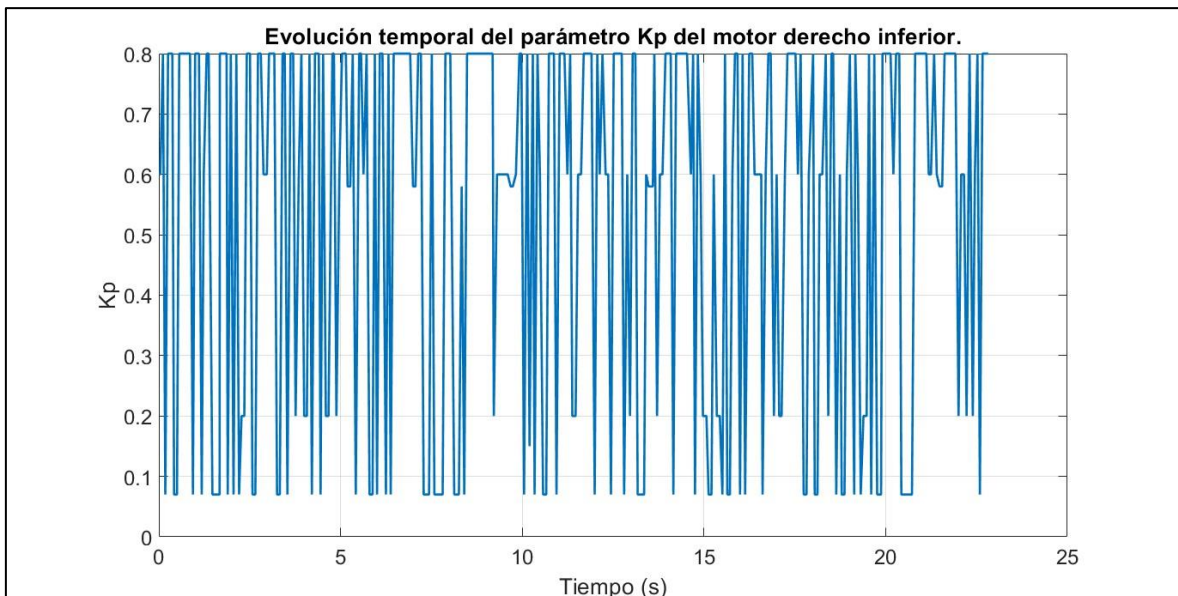


Gráfico 141. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

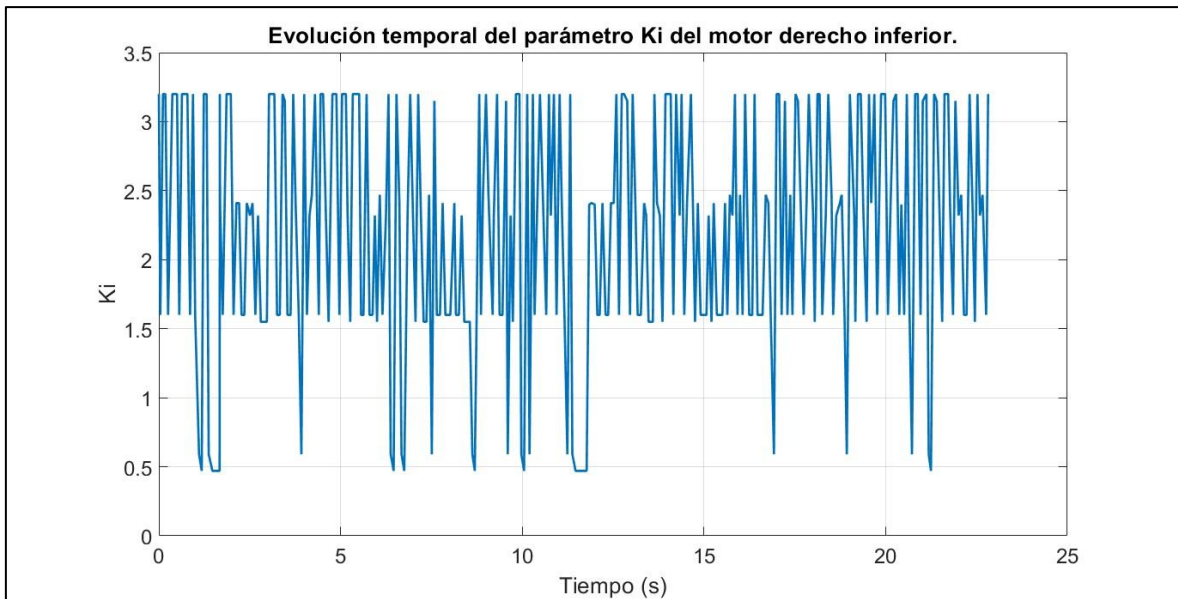


Gráfico 142. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

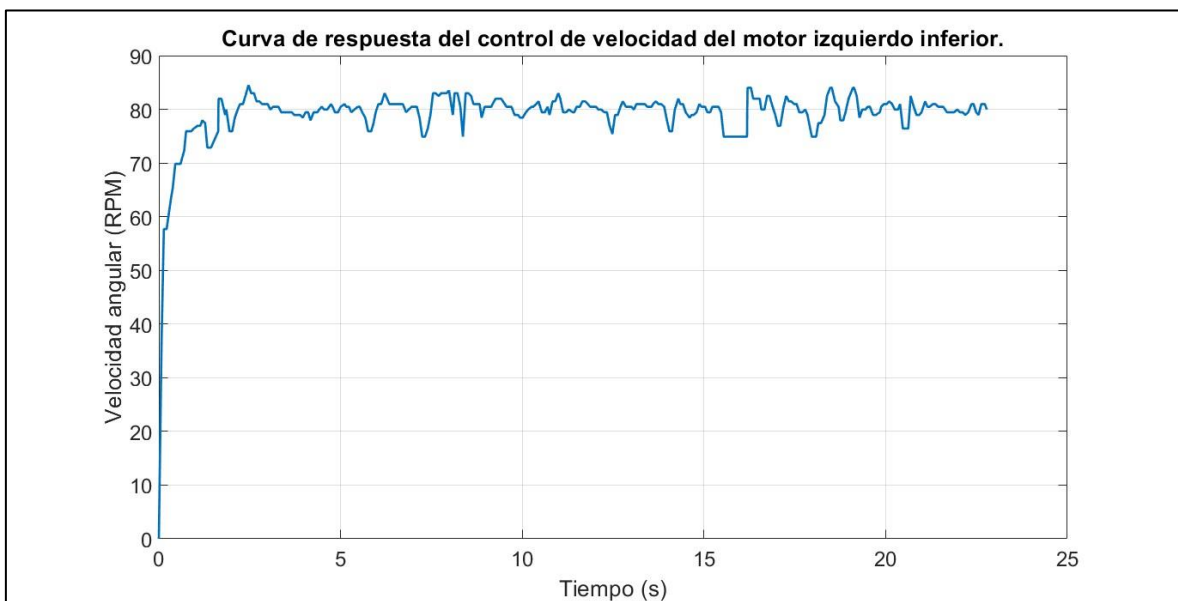
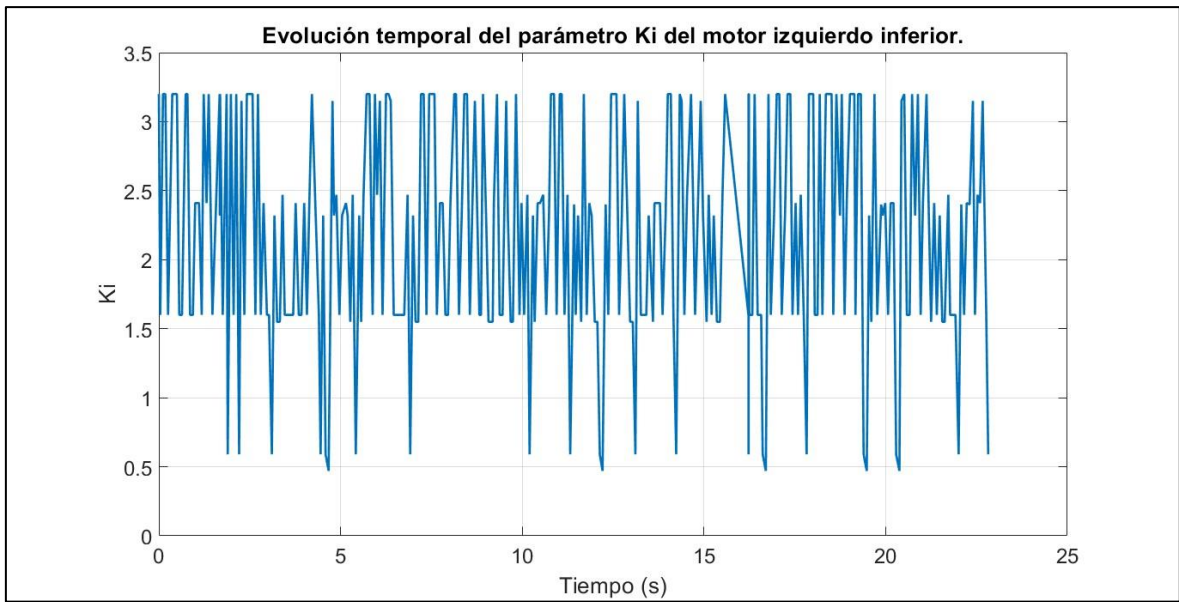
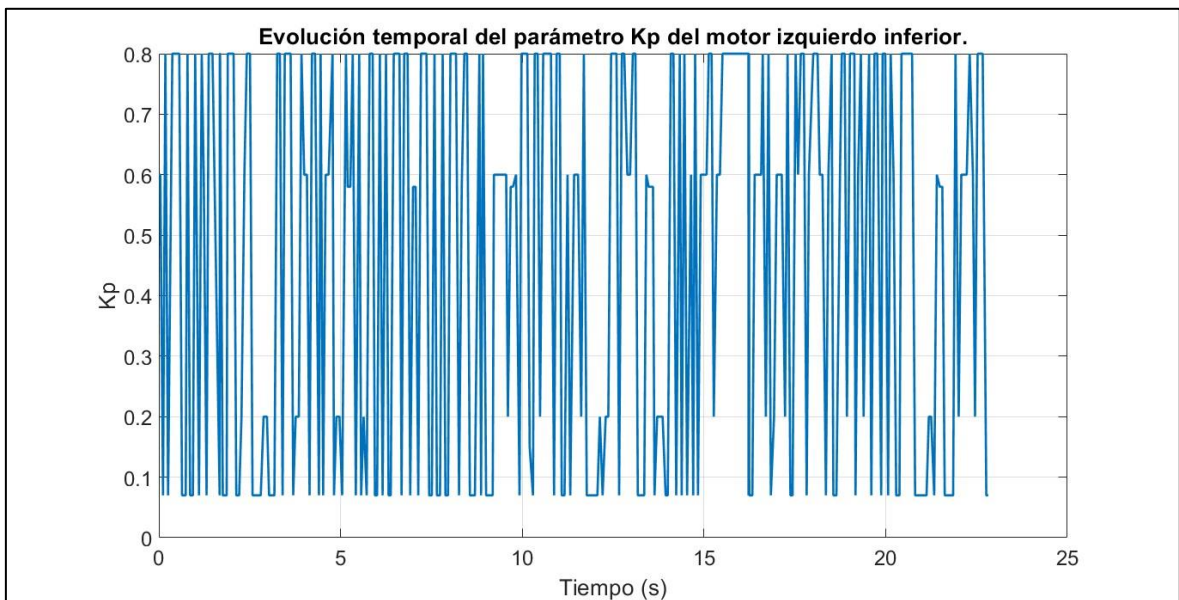


Gráfico 143. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.



*Gráfico 144. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.*



*Gráfico 145. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.*

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

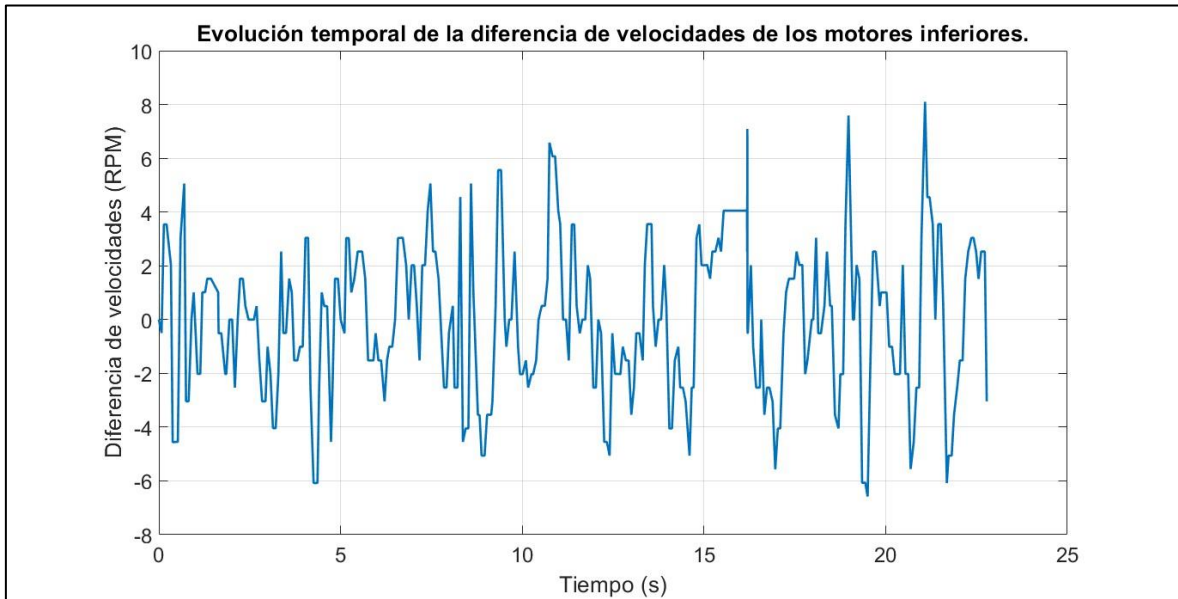


Gráfico 146. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

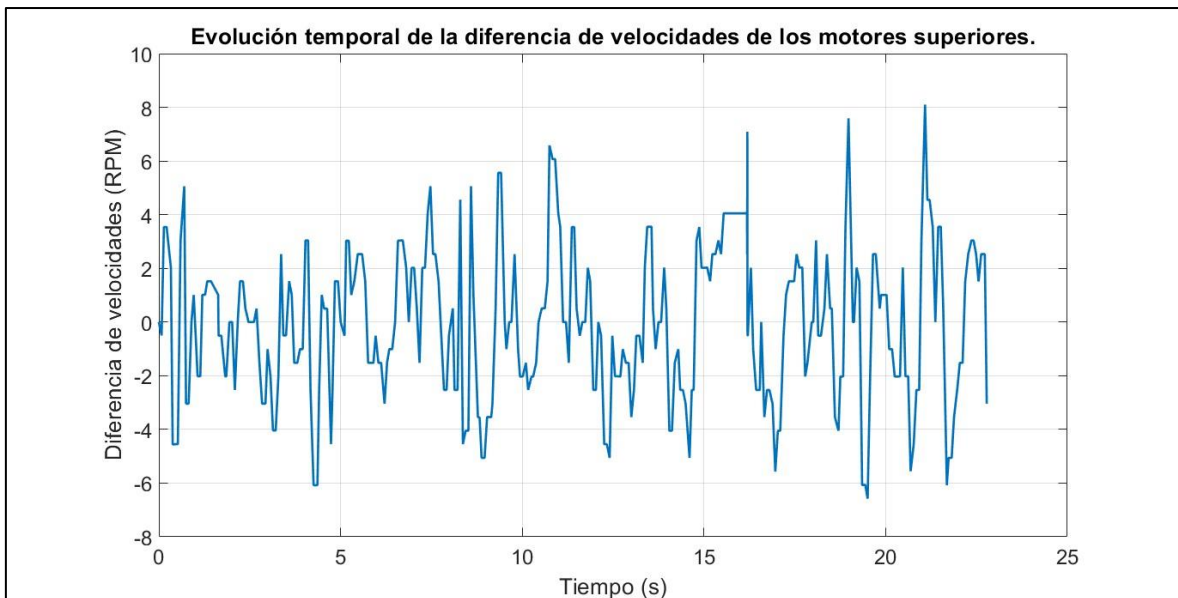


Gráfico 147. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=80 RPM, N° zonas=5										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub(s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1	1.141	0.076	0.598	1.943	9.438	1.843	2.303	0.49	2.315	-0.116
MOTOR 2	1.065	0.074	0.698	2.091	6.275	1.54	1.925	0.491	2.197	
MOTOR 3	1.825	0.074	0.596	1.941	6.275	1.318	1.648	0.534	2.208	0.157
MOTOR 4	2.539	0.075	0.699	1.639	5.638	1.346	1.681	0.455	2.19	
Promedio	1.643	0.075	0.648	1.904	6.907	1.512	1.889	0.493	2.228	

Tabla 28. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 80RPM autosintonizados con 5 zonas.

d) Setpoint por motor de 90 RPM

- Motor izquierdo superior

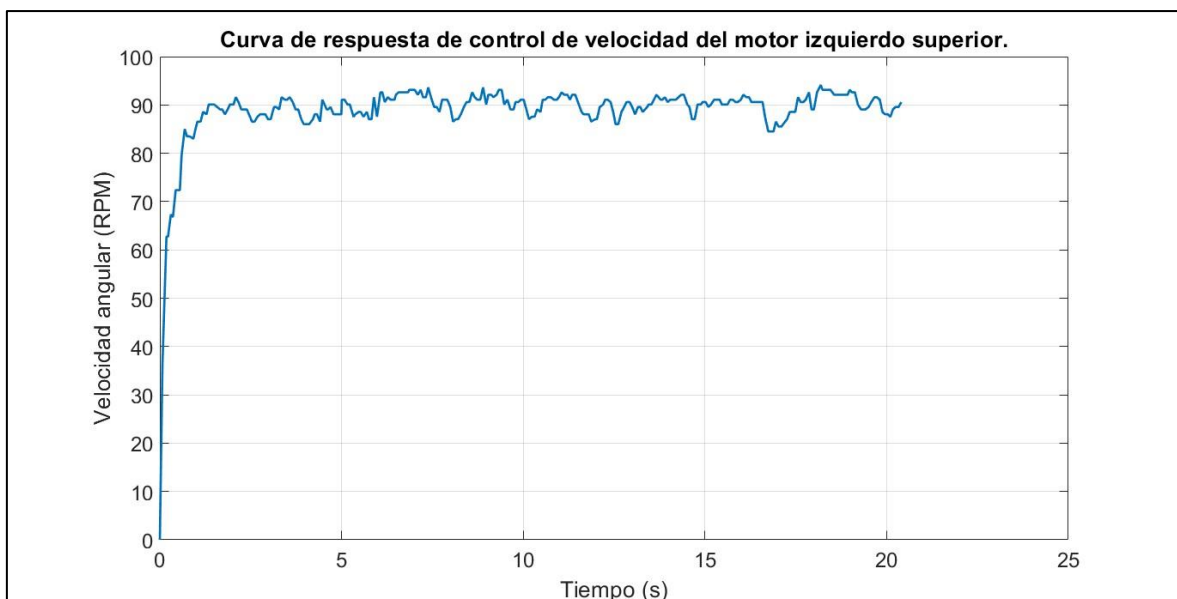
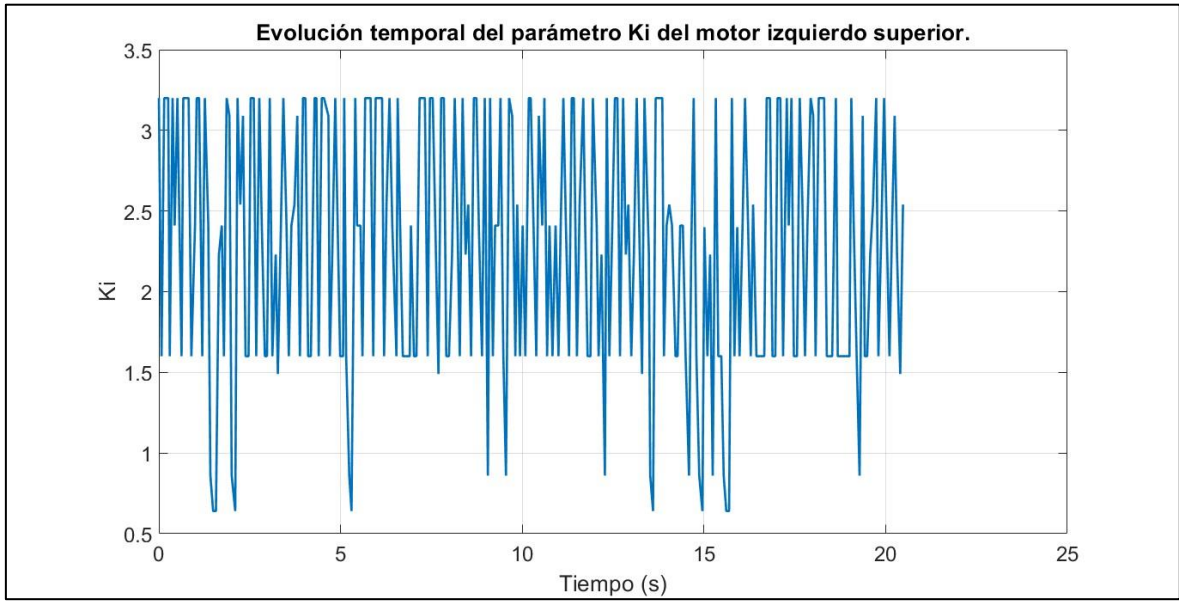
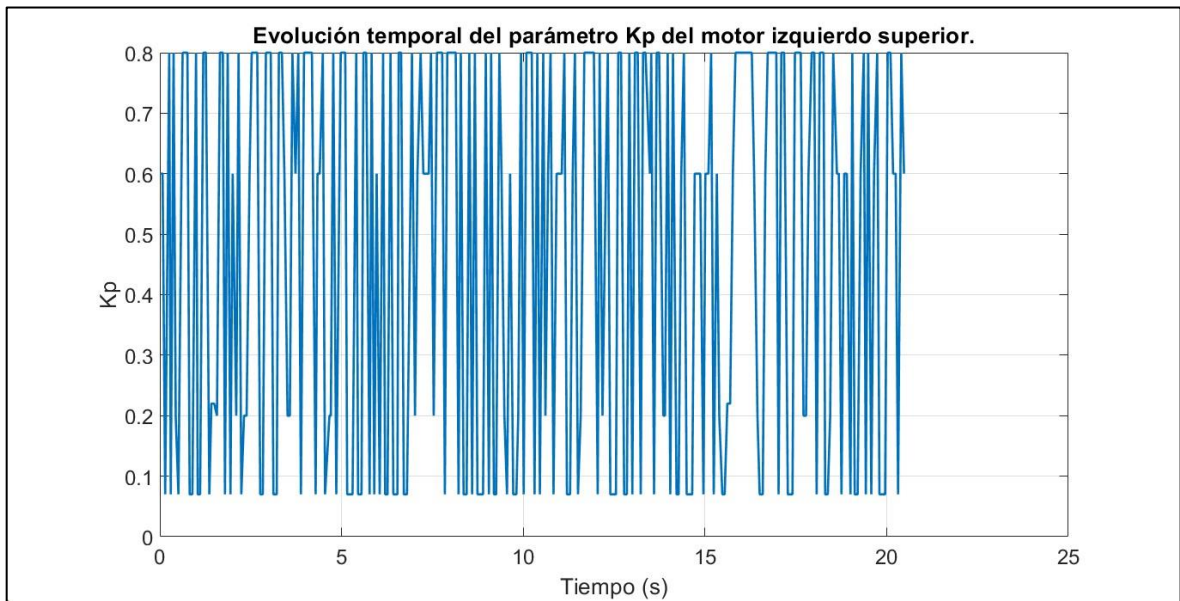


Gráfico 148. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.





*Gráfico 149. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.*



*Gráfico 150. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.*

- Motor derecho superior

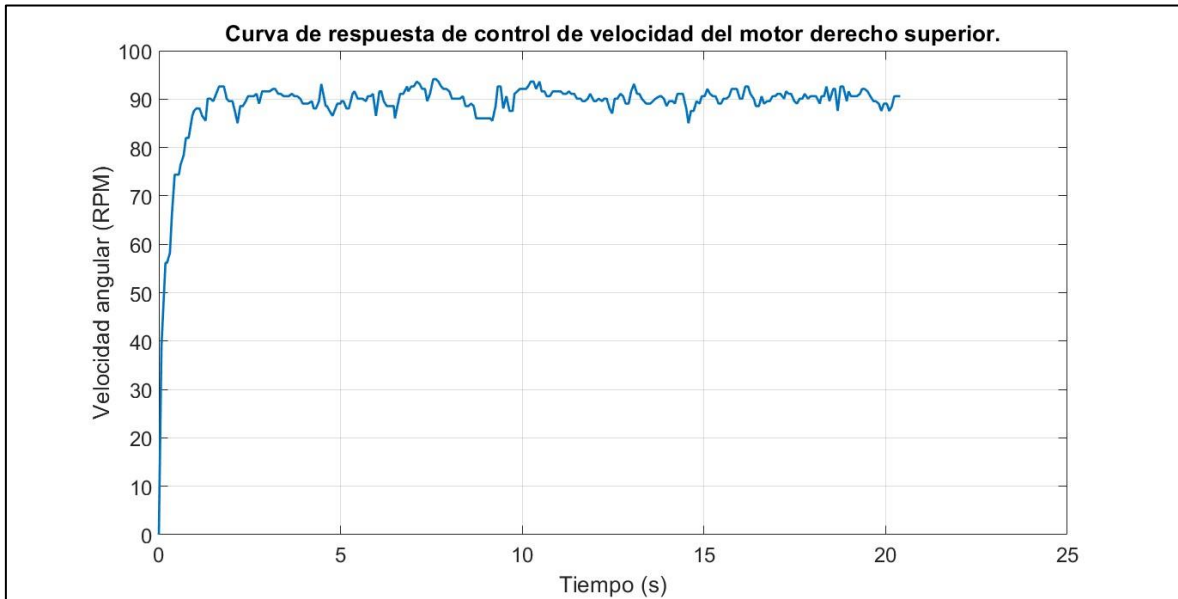


Gráfico 151. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

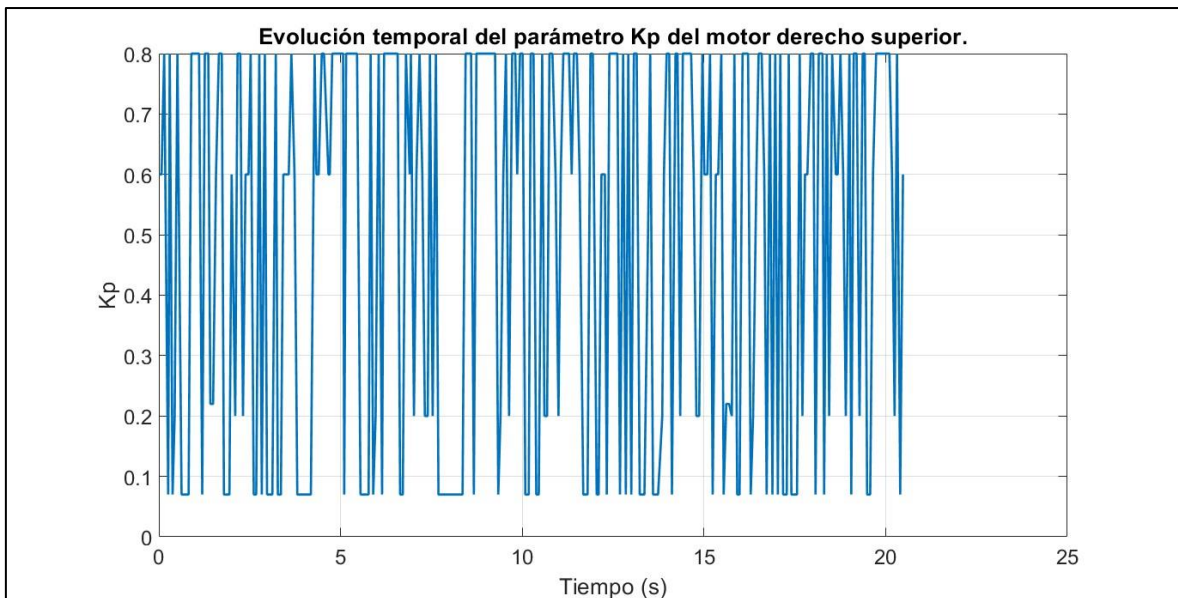


Gráfico 152. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

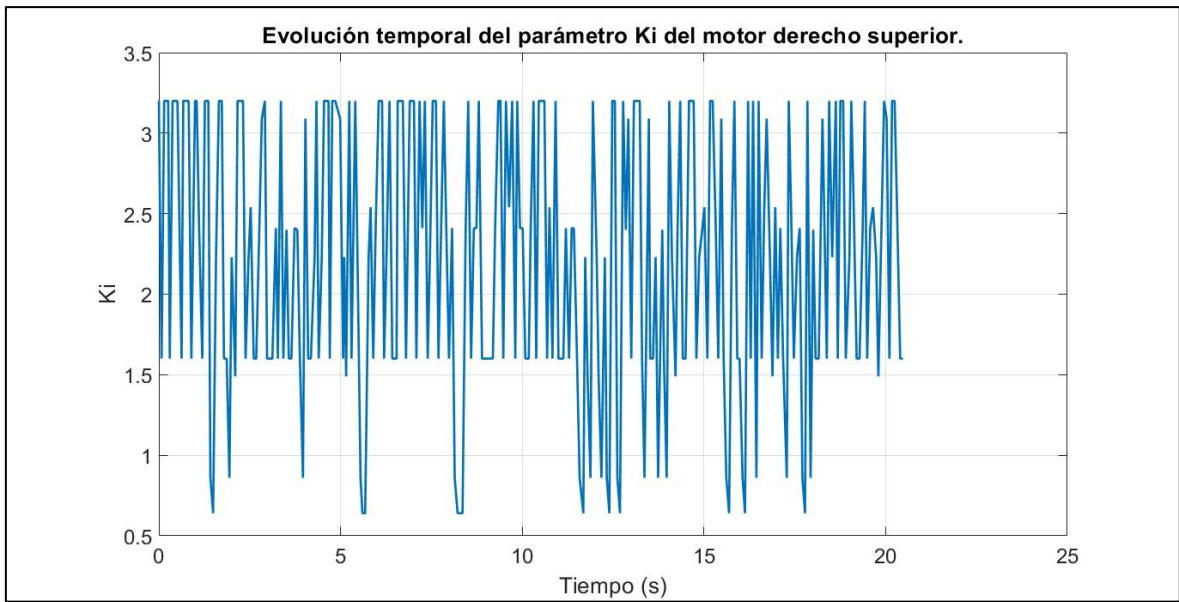


Gráfico 153. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

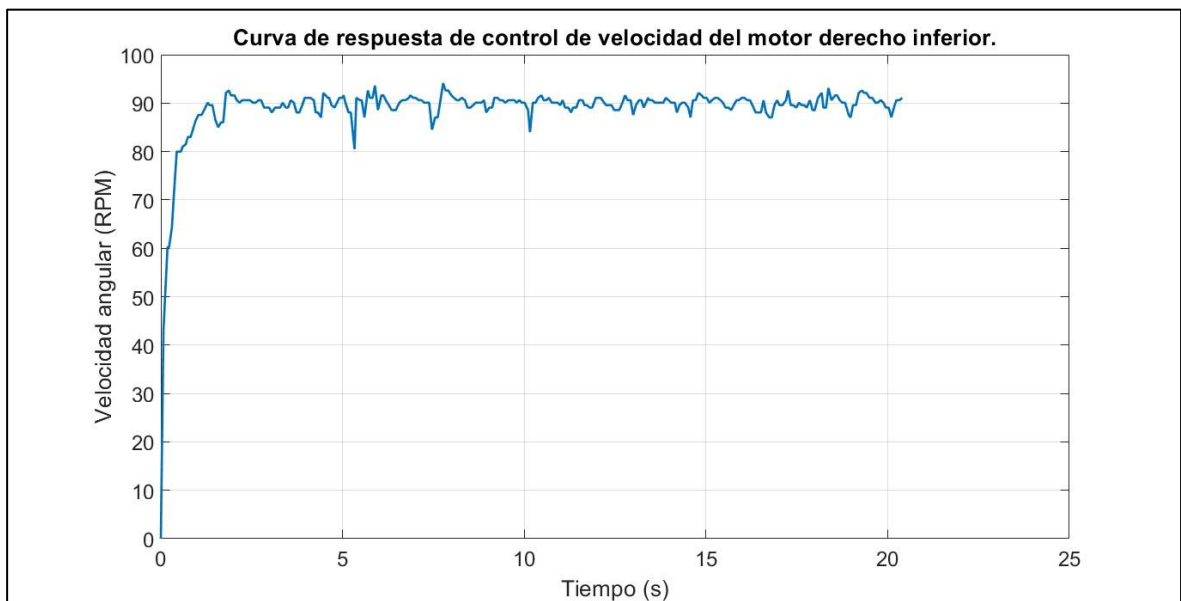


Gráfico 154. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

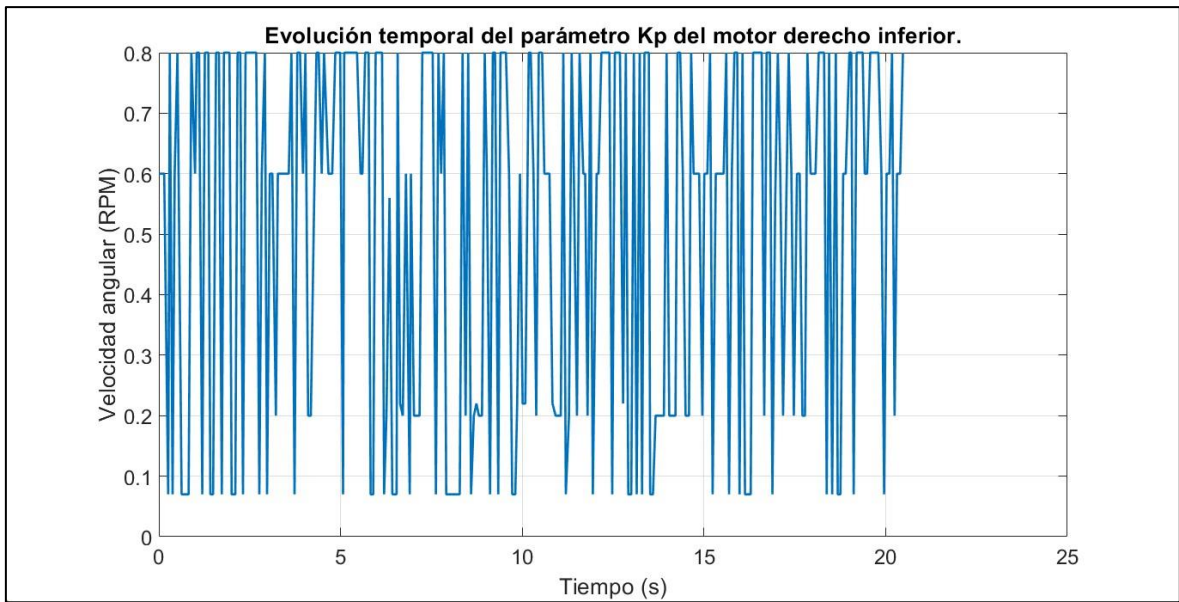


Gráfico 155. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

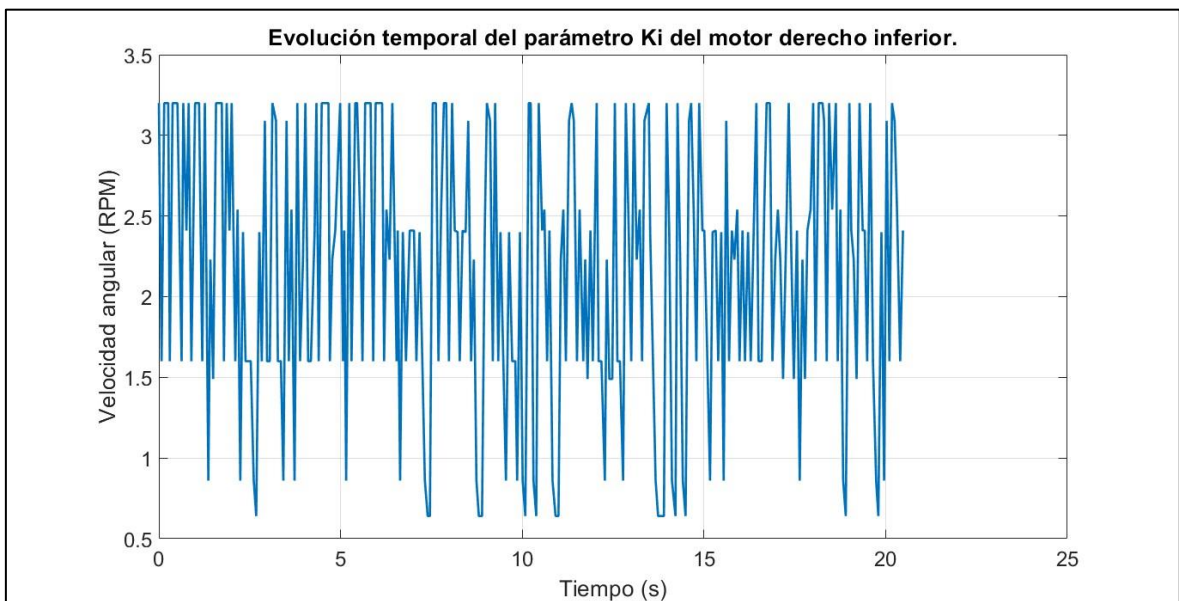


Gráfico 156. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

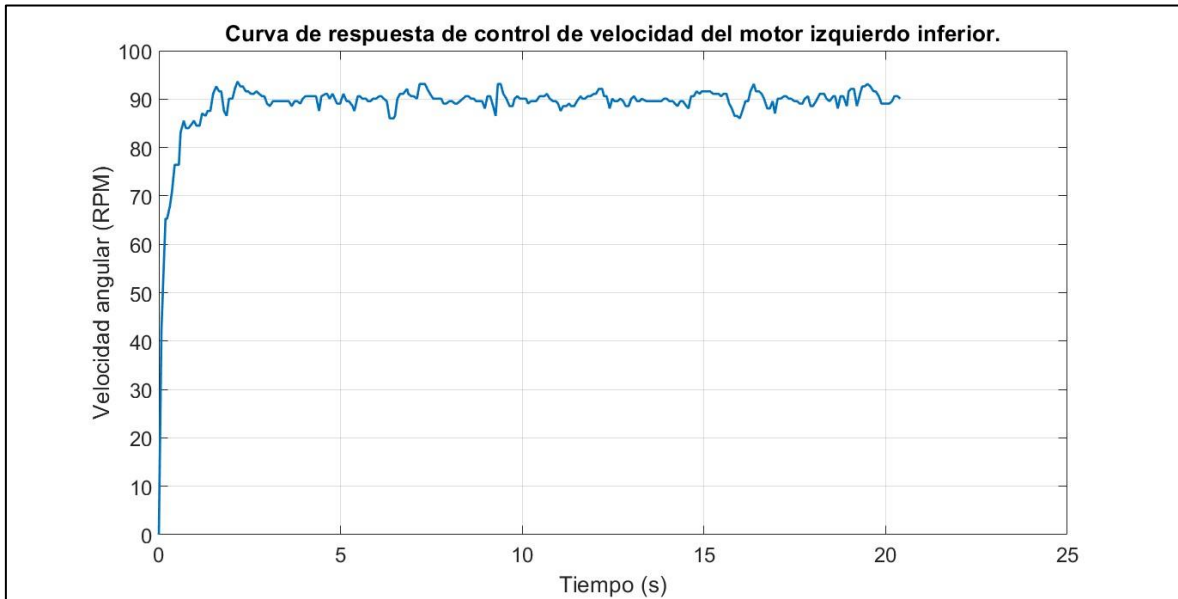


Gráfico 157. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

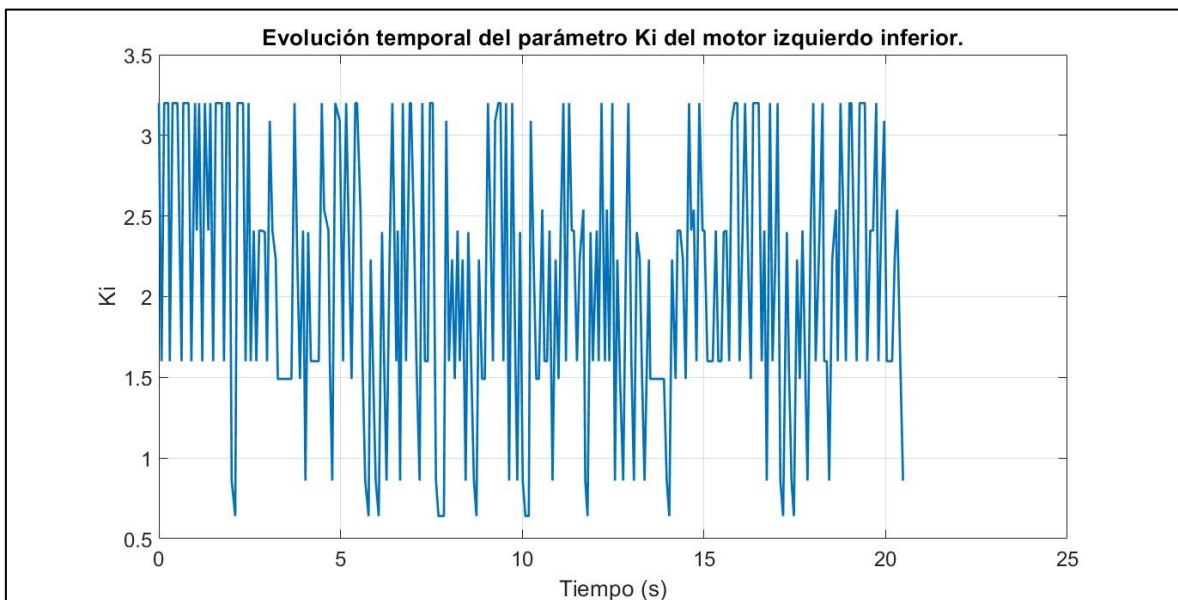


Gráfico 158. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

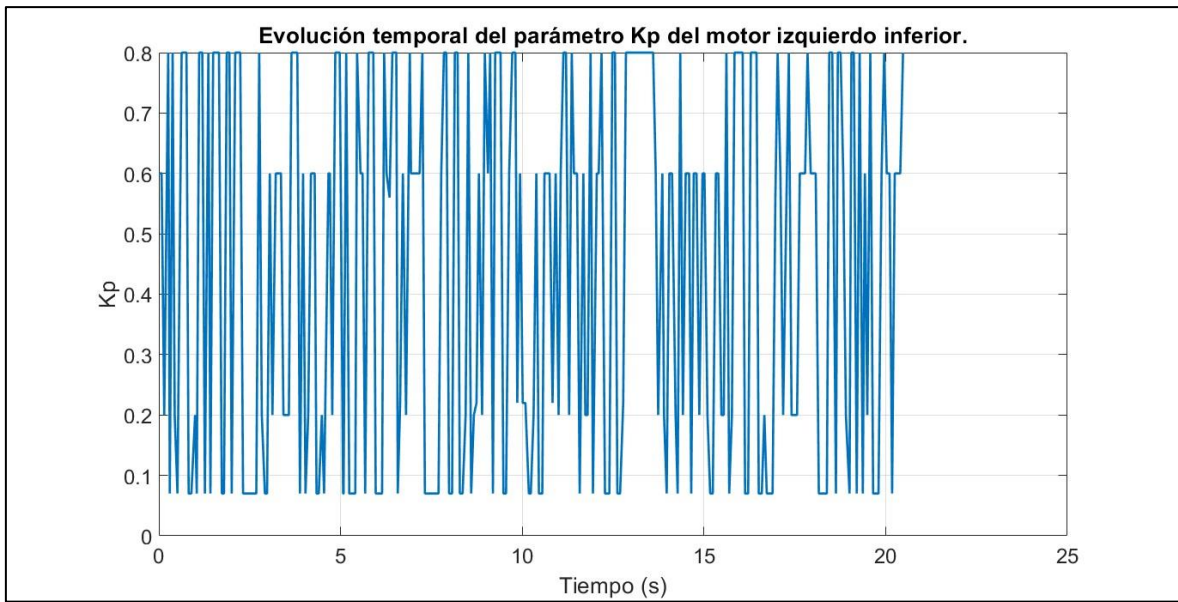


Gráfico 159. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

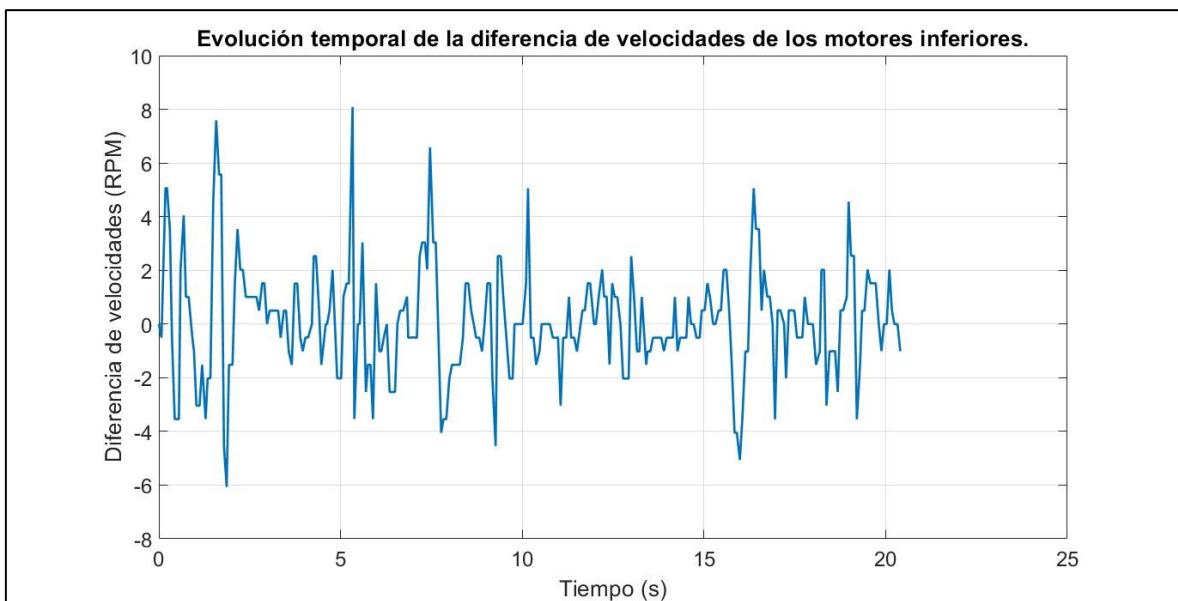


Gráfico 160. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

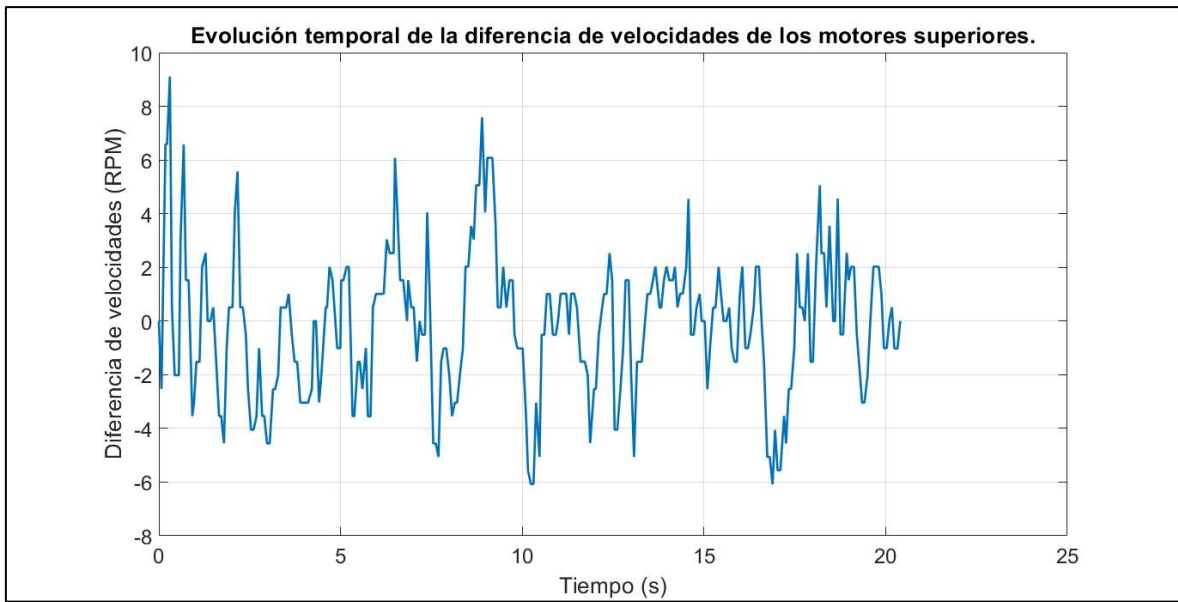


Gráfico 161. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=90 RPM, N° zonas=5										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1	0.967	0.072	0.597	1.497	4.589	1.658	1.843	0.466	2.283	-0.164
MOTOR 2	0.921	0.072	0.745	1.657	4.589	1.389	1.544	0.486	2.216	
MOTOR 3	1.578	0.072	0.597	1.868	4.589	1.105	1.228	0.509	2.163	0.101
MOTOR 4	1.121	0.072	0.597	1.578	4.022	1.074	1.193	0.439	2.089	
Promedio	1.147	0.072	0.634	1.650	4.447	1.307	1.452	0.475	2.188	

Tabla 29. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 90RPM autosintonizados con 5 zonas.

e) Velocidad general de robot diferencial.

- Setpoint de 16.336 cm/s

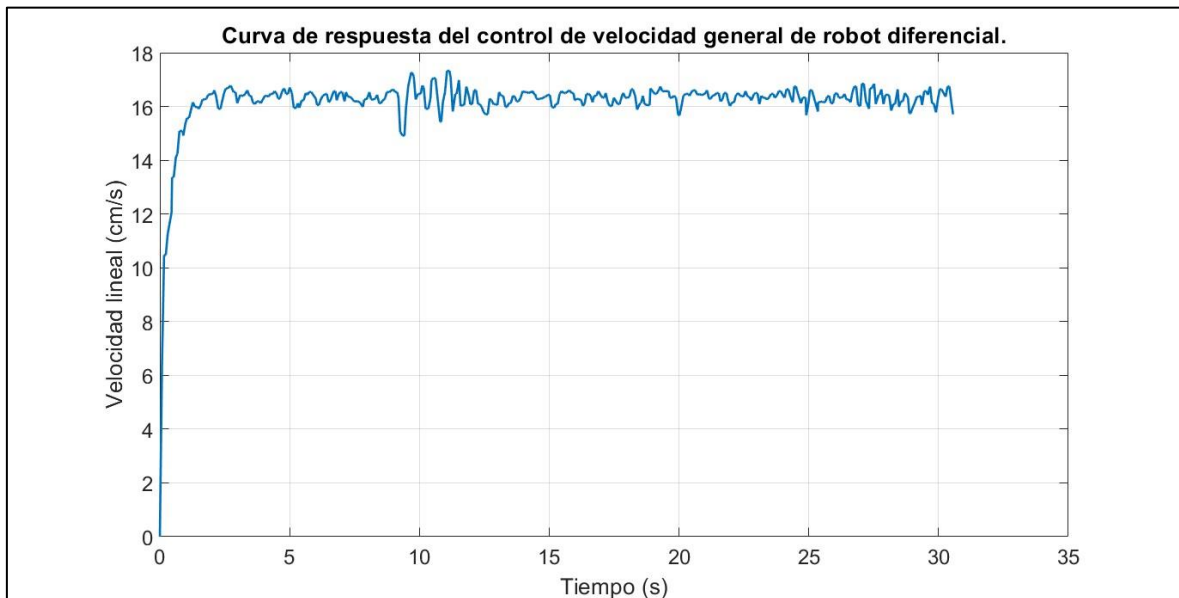


Gráfico 162. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 16.336 cm/s.

- Setpoint de 19.059 cm/s

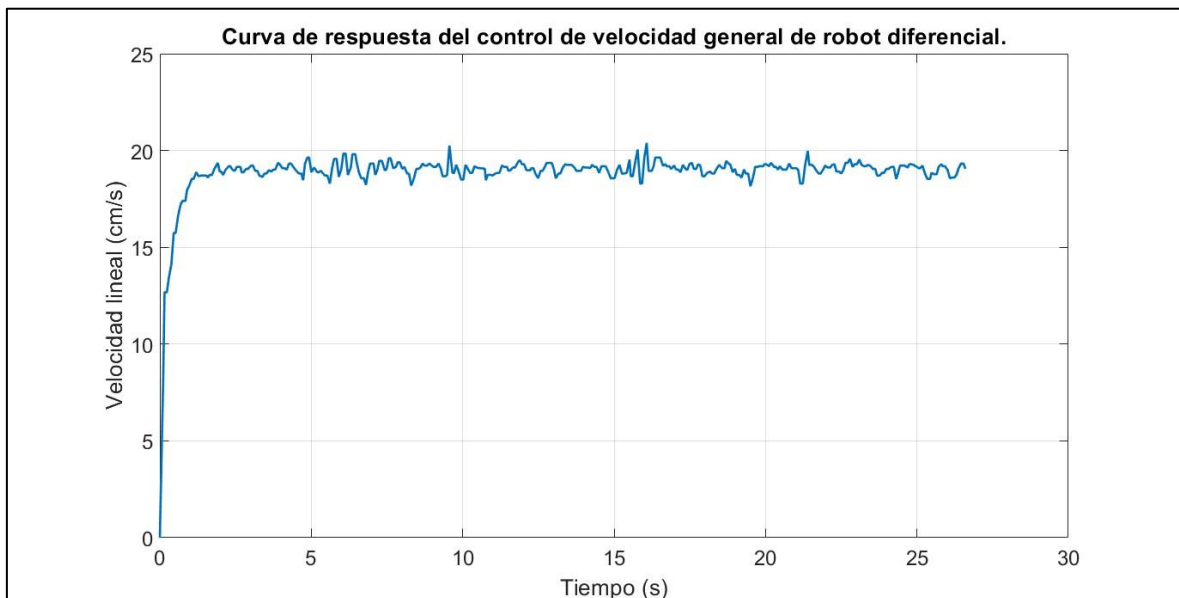


Gráfico 163. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 19.059 cm/s.



- Setpoint de 21.782 cm/s

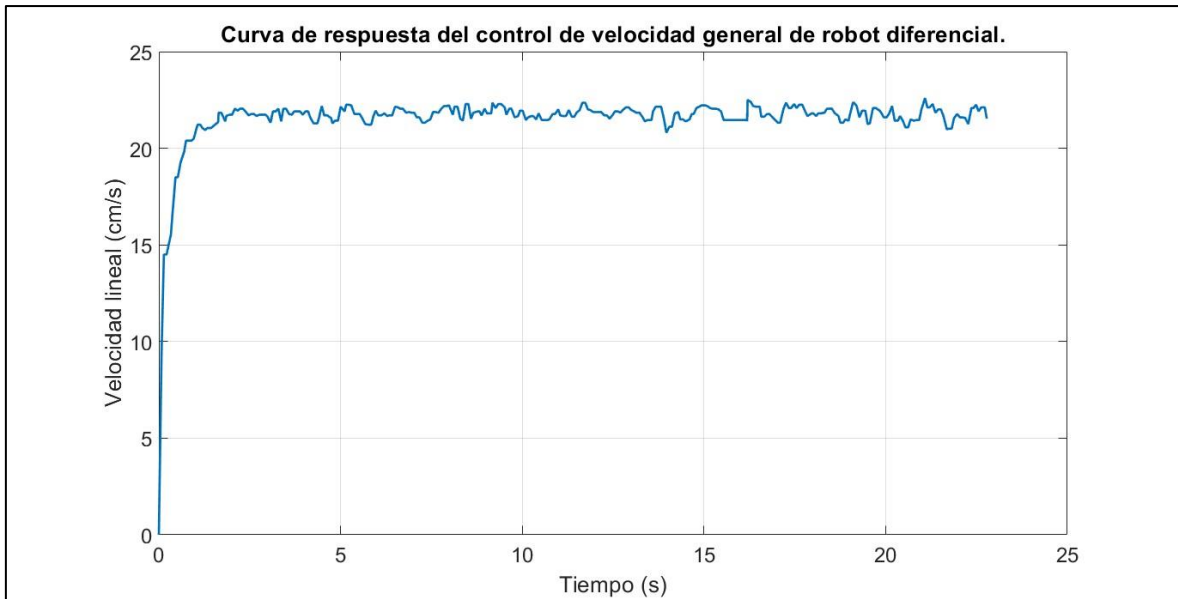


Gráfico 164. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 21.782 cm/s.

- Setpoint de 24.502 cm/s

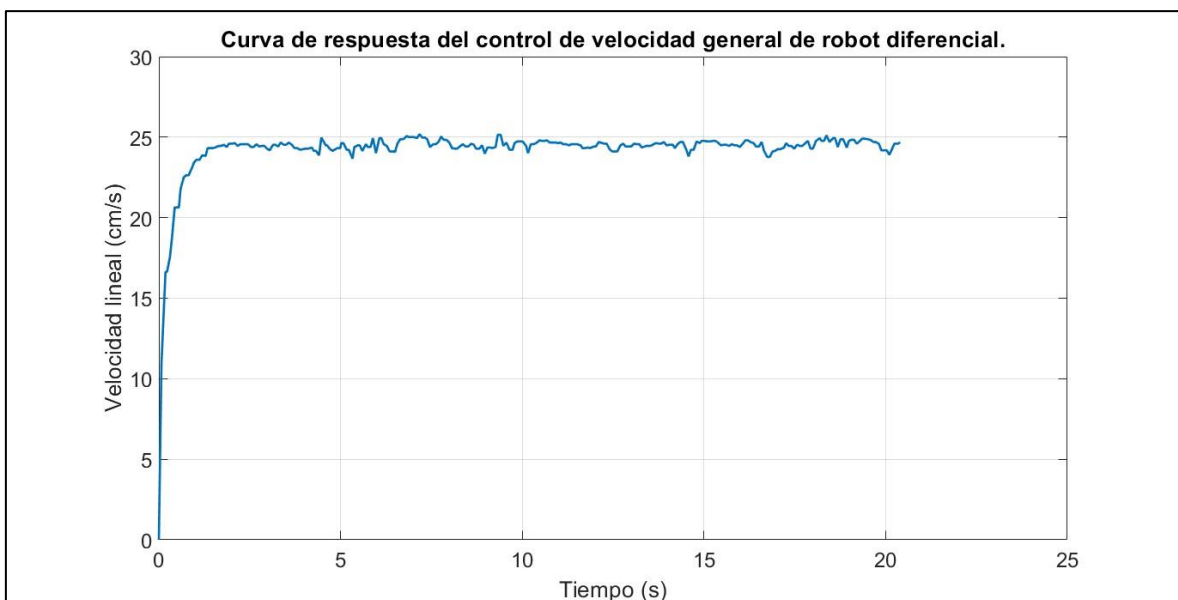


Gráfico 165. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 24.502 cm/s.

- Características en el dominio del tiempo

N° zonas=5									
Velocidad lineal (cm/s)	Velocidad por motor	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (cm/s)	% Ess prom	θ prom (rad/s)
16.336	60 RPM	1.044	0.083	0.755	1.971	6.065	0.221	1.355	-0.001
19.059	70 RPM	0.979	0.108	0.695	1.913	6.99	0.24	1.261	-0.004
21.782	80 RPM	1.065	0.075	0.699	1.646	3.743	0.263	1.206	0.0006
24.504	90 RPM	0.922	0.072	0.597	1.792	2.767	0.221	0.902	-0.001

Tabla 30. Características en el dominio del tiempo de la velocidad general del robot diferencial autosintonizado con 5 zonas.

#### 4.2.3. Sistema de autosintonización de 7 zonas.

##### a) Setpoint por motor de 60 RPM

- Motor izquierdo superior

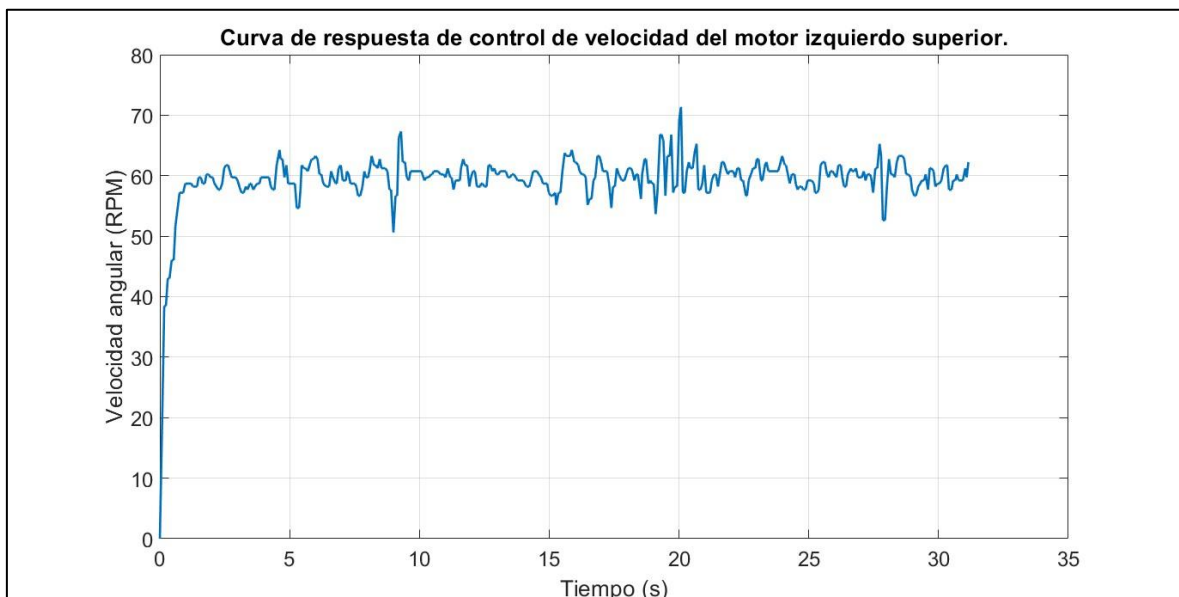
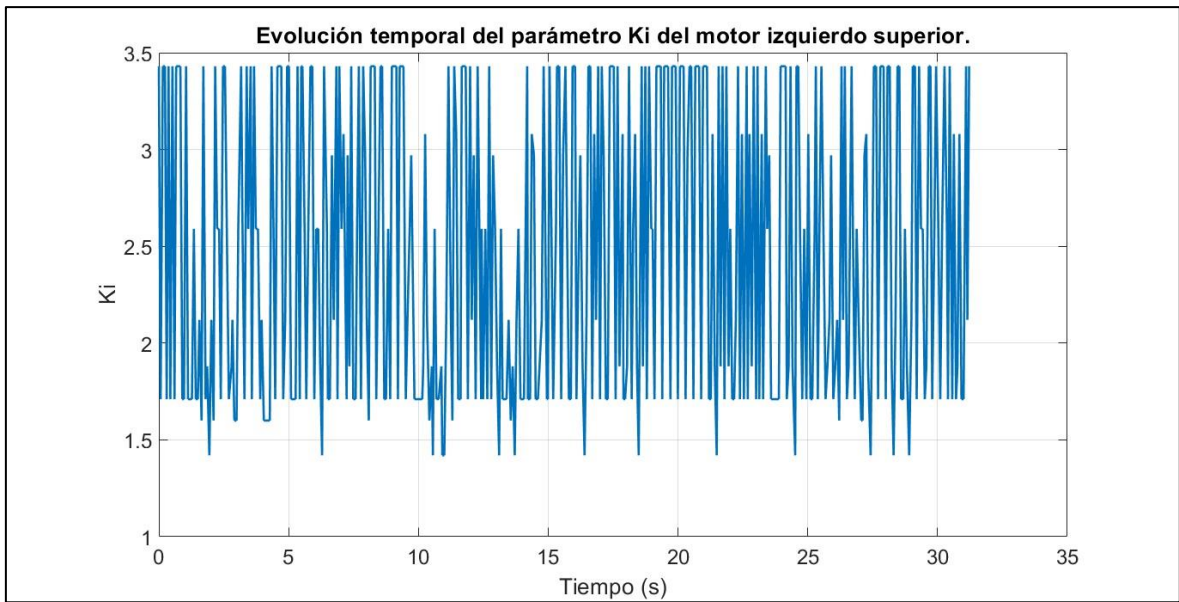
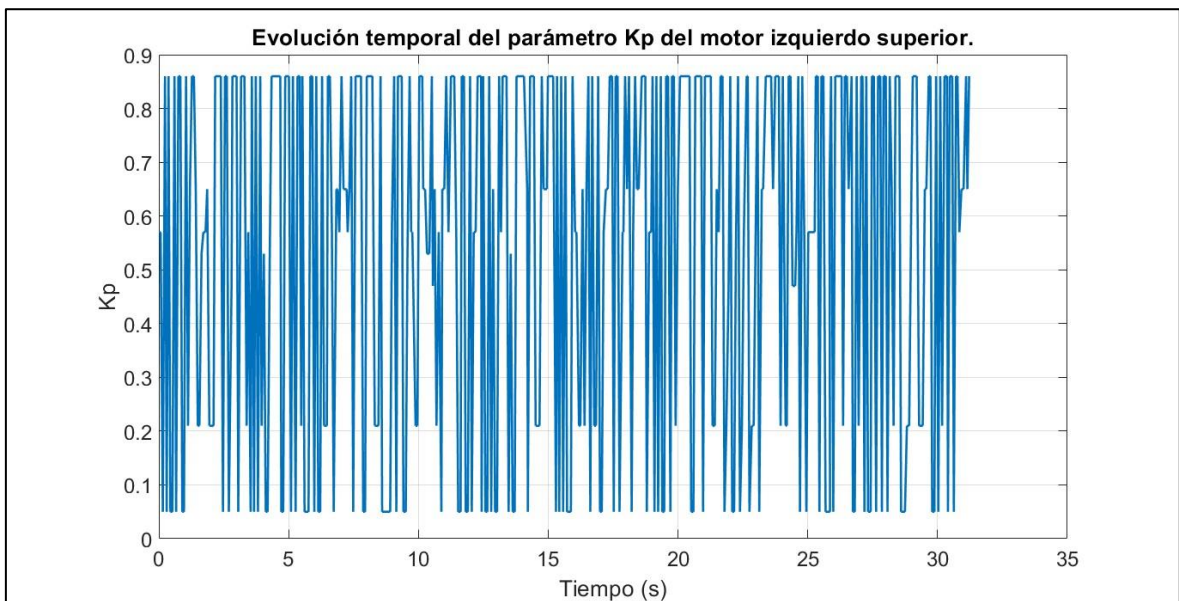


Gráfico 166. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.



*Gráfico 167. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.*



*Gráfico 168. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.*

- Motor derecho superior

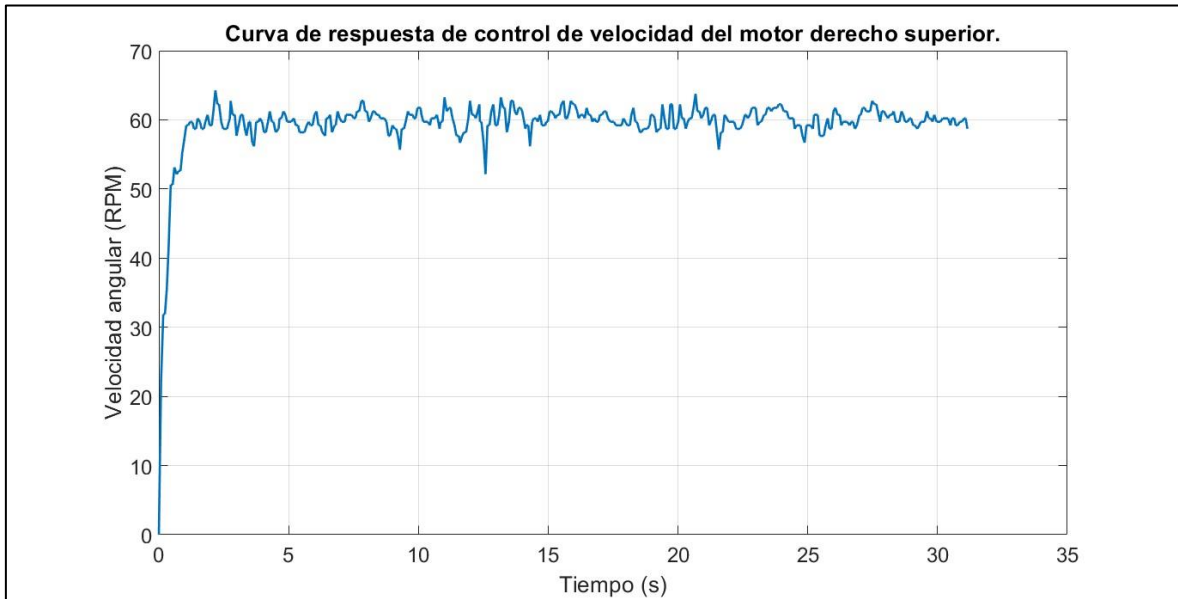


Gráfico 169. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

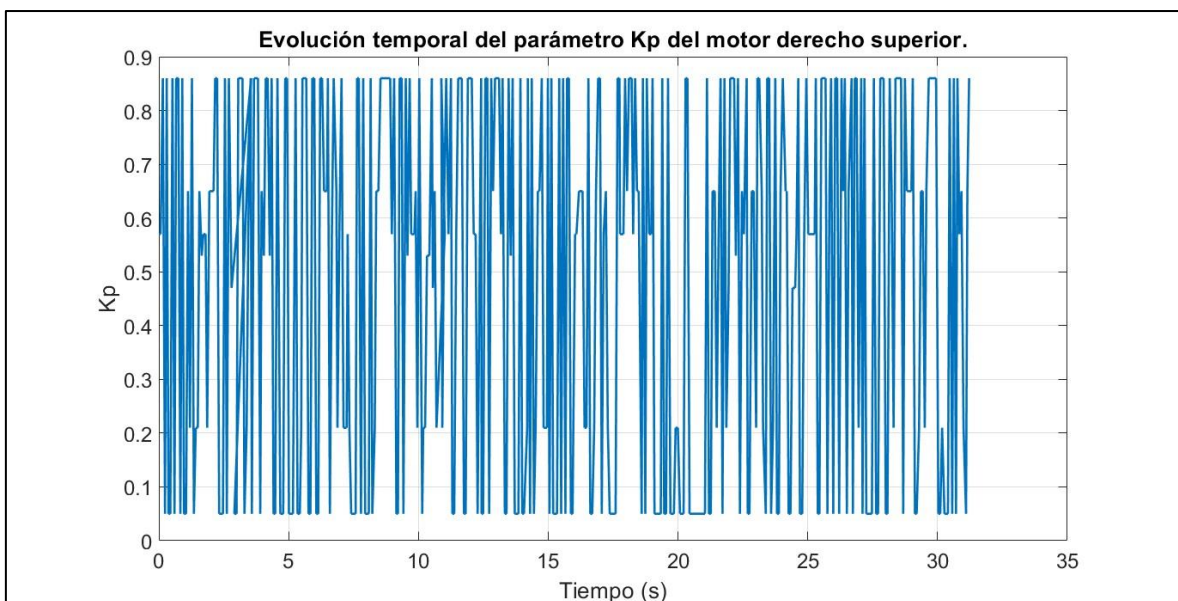


Gráfico 170. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

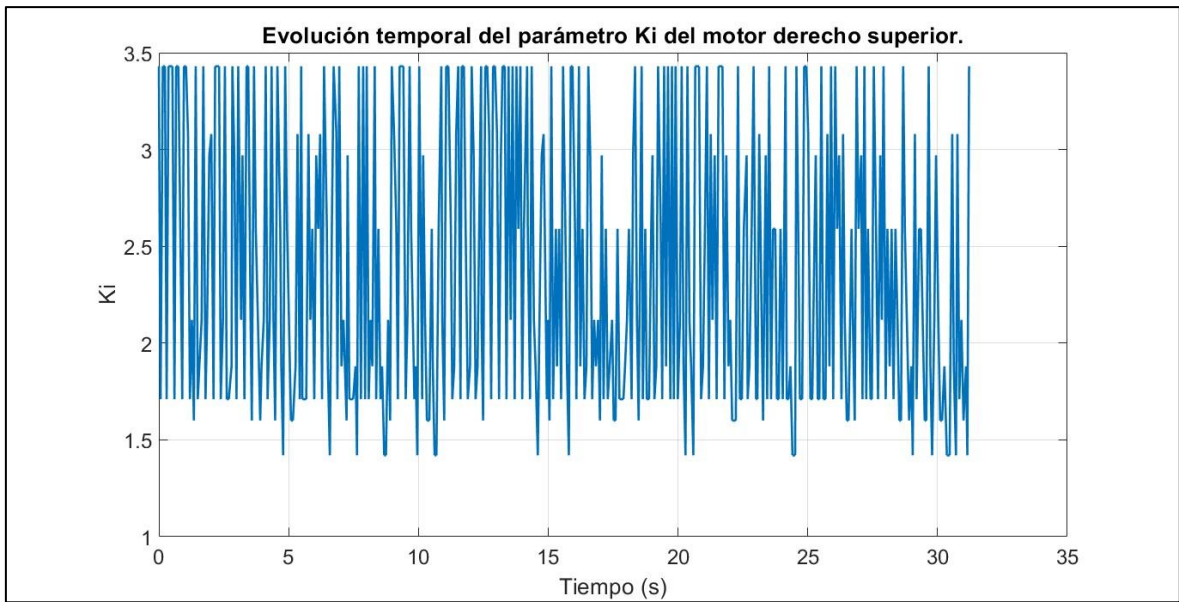


Gráfico 171. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

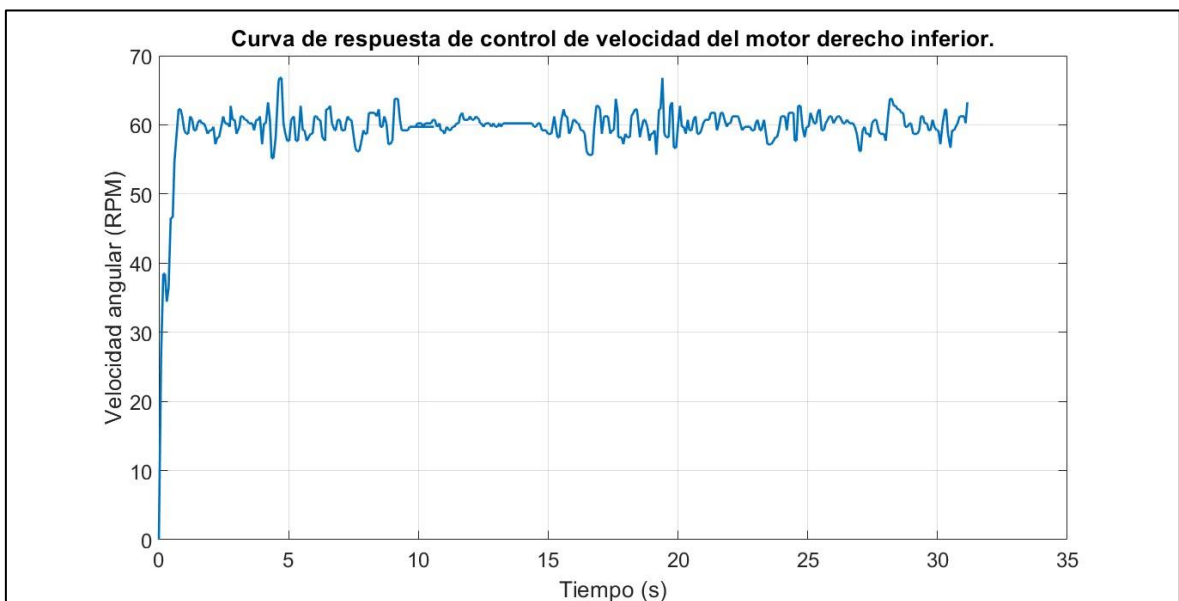


Gráfico 172. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

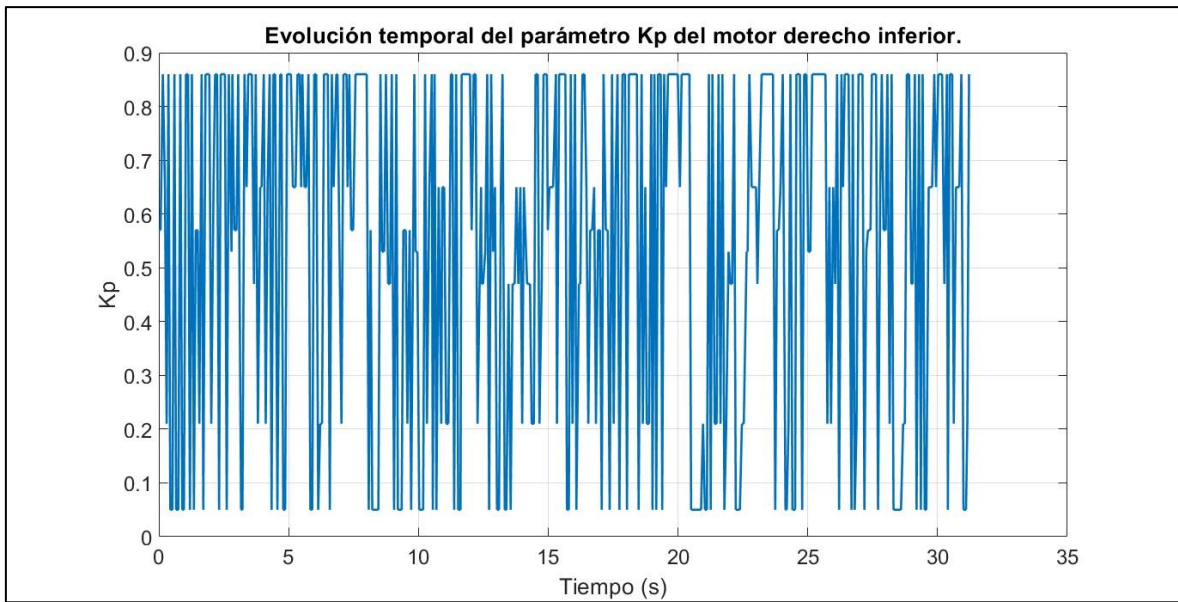


Gráfico 173. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

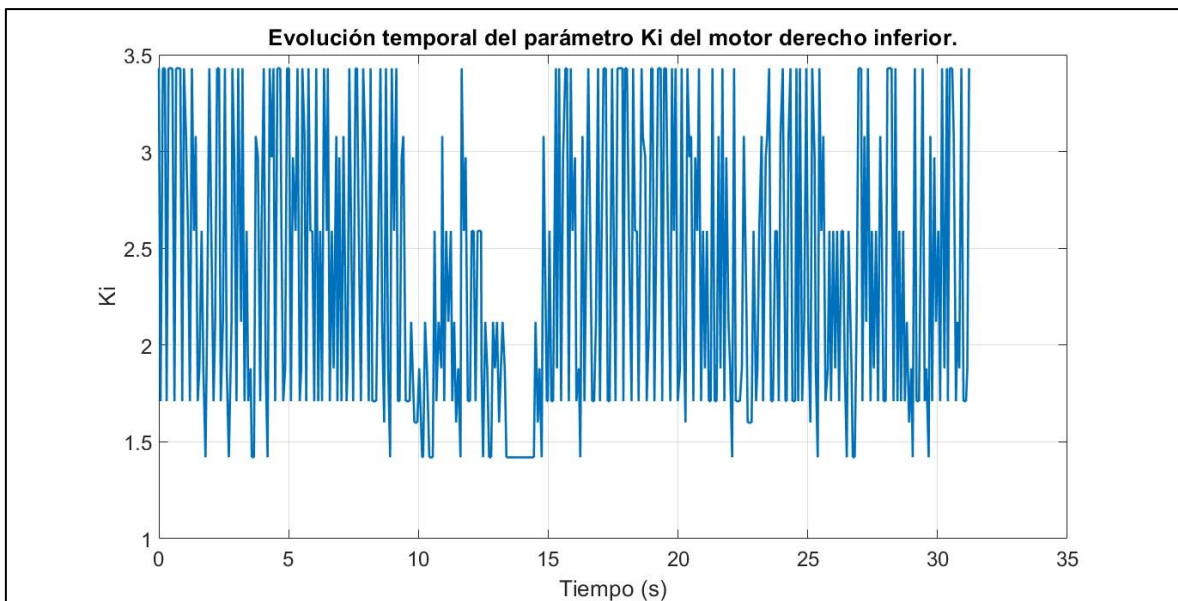


Gráfico 174. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

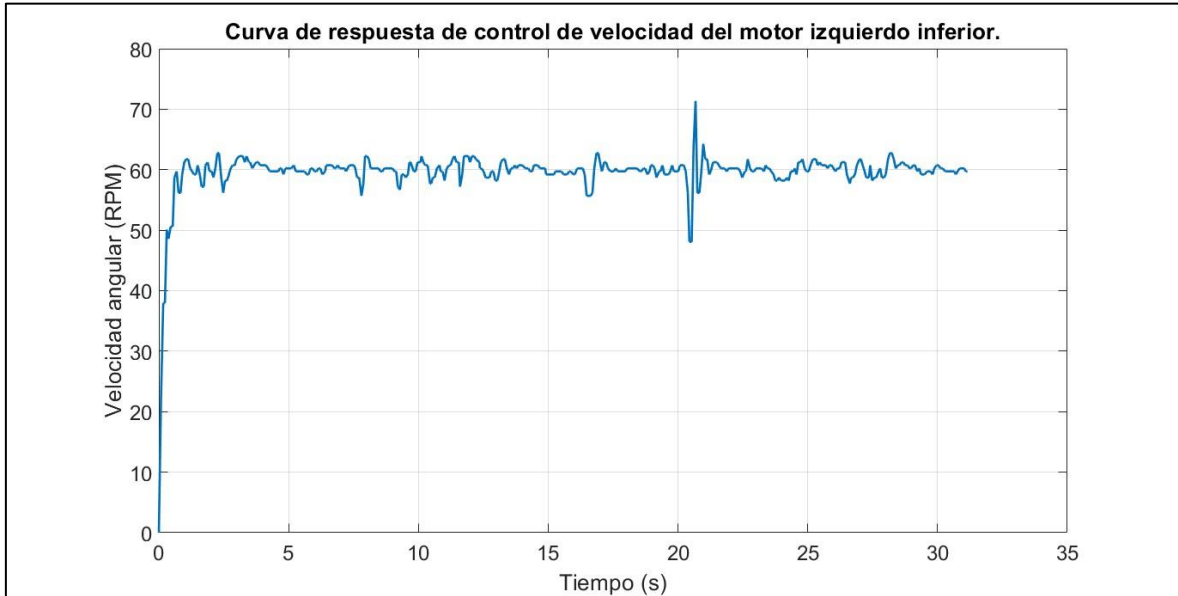


Gráfico 175. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

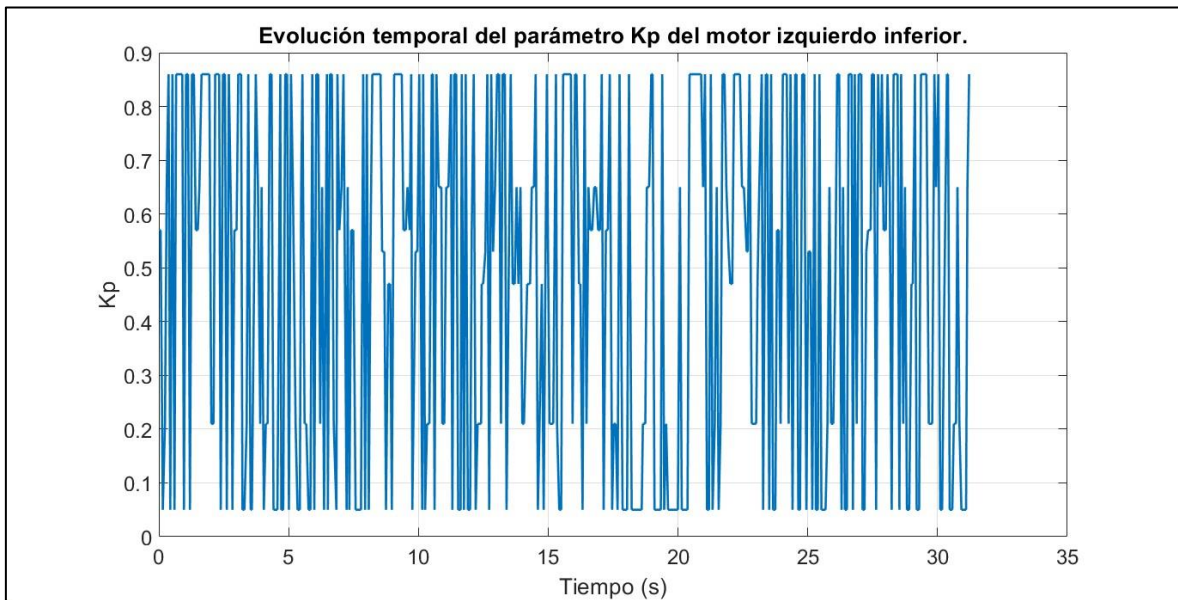


Gráfico 176. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

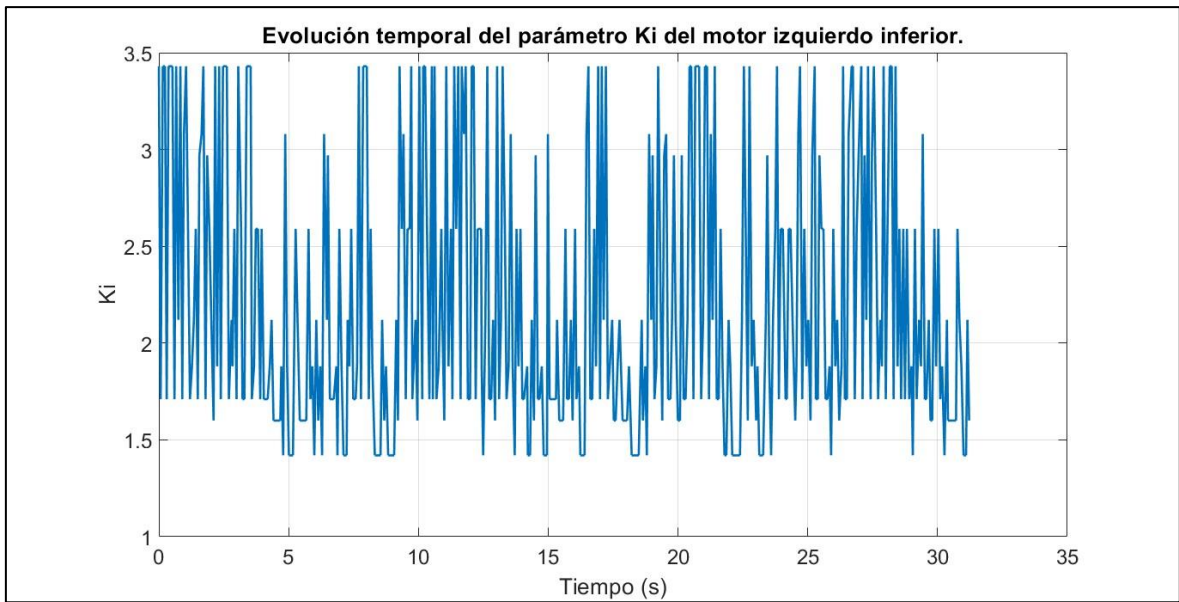


Gráfico 177. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

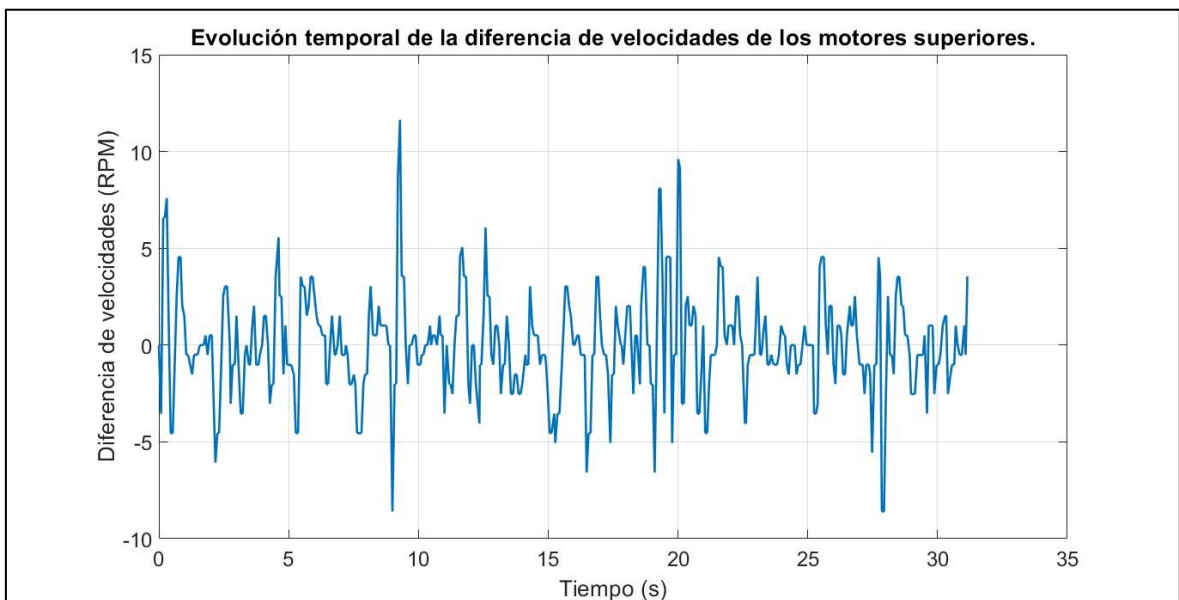


Gráfico 178. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.



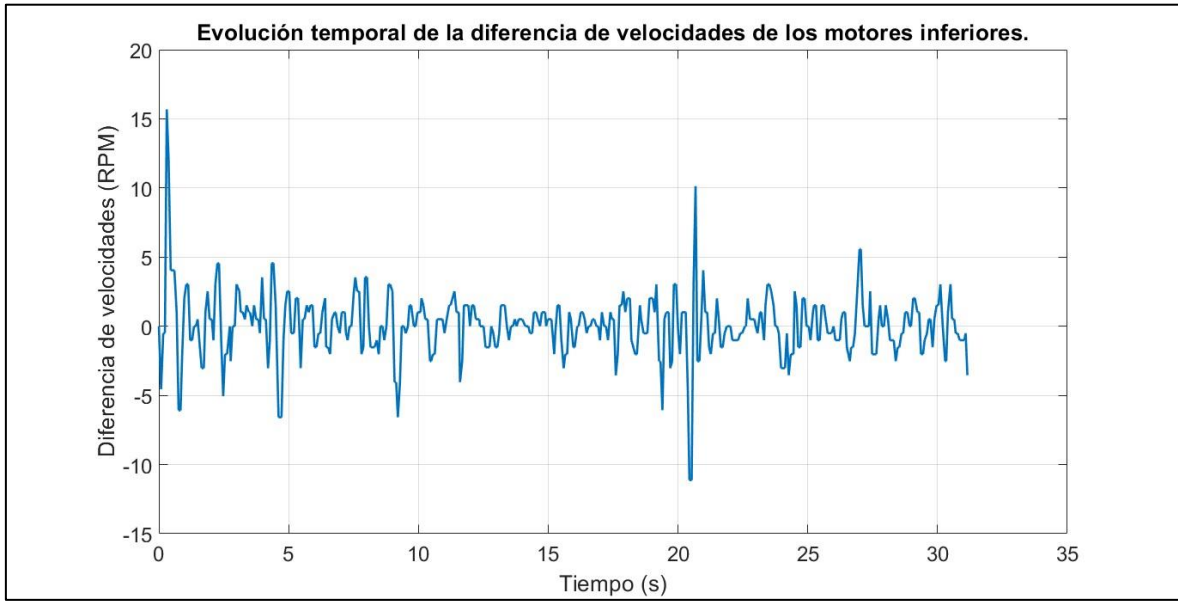


Gráfico 179. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=60 RPM, N° zonas=7										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1	0.761	0.169	0.686	1.795	18.933	1.654	2.758	0.54	2.467	-0.027
MOTOR 2	0.981	0.17	0.599	1.494	7.117	1.047	1.745	0.473	2.376	
MOTOR 3	0.686	0.088	0.6	0.836	11.333	1.242	2.07	0.543	2.365	0.0624
MOTOR 4	0.835	0.084	0.456	1.13	18.93	0.967	1.611	0.477	2.202	
Promedio	0.816	0.128	0.585	1.314	14.078	1.23	2.046	0.508	2.353	

Tabla 31. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 60RPM autosintonizados con 7 zonas.

b) Setpoint por motor de 70 RPM

- Motor izquierdo superior

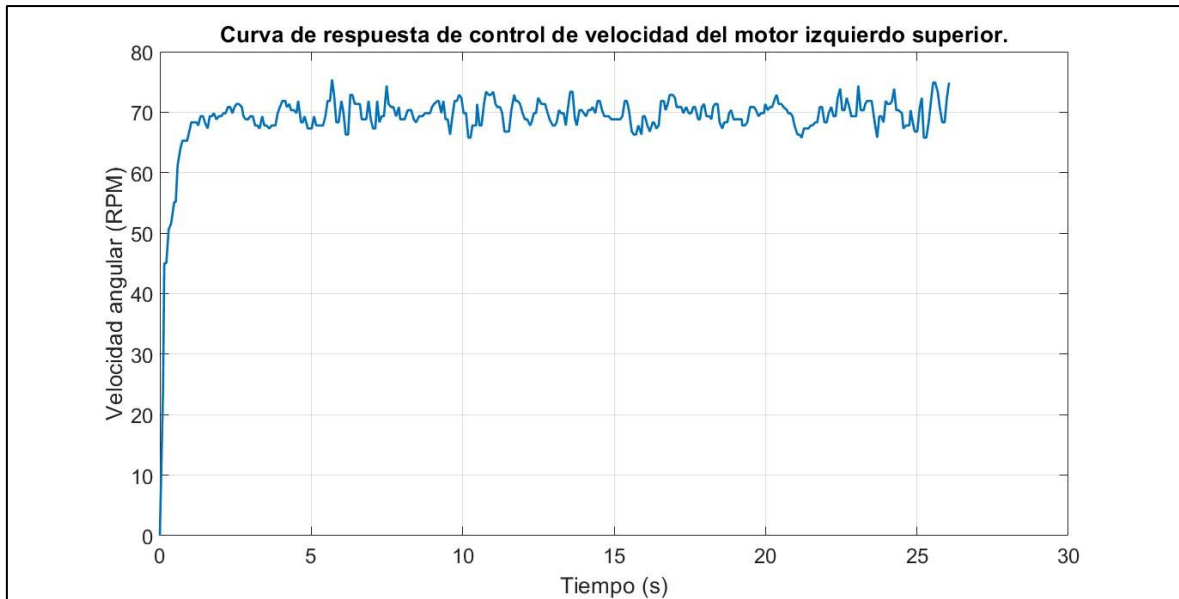


Gráfico 180. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.

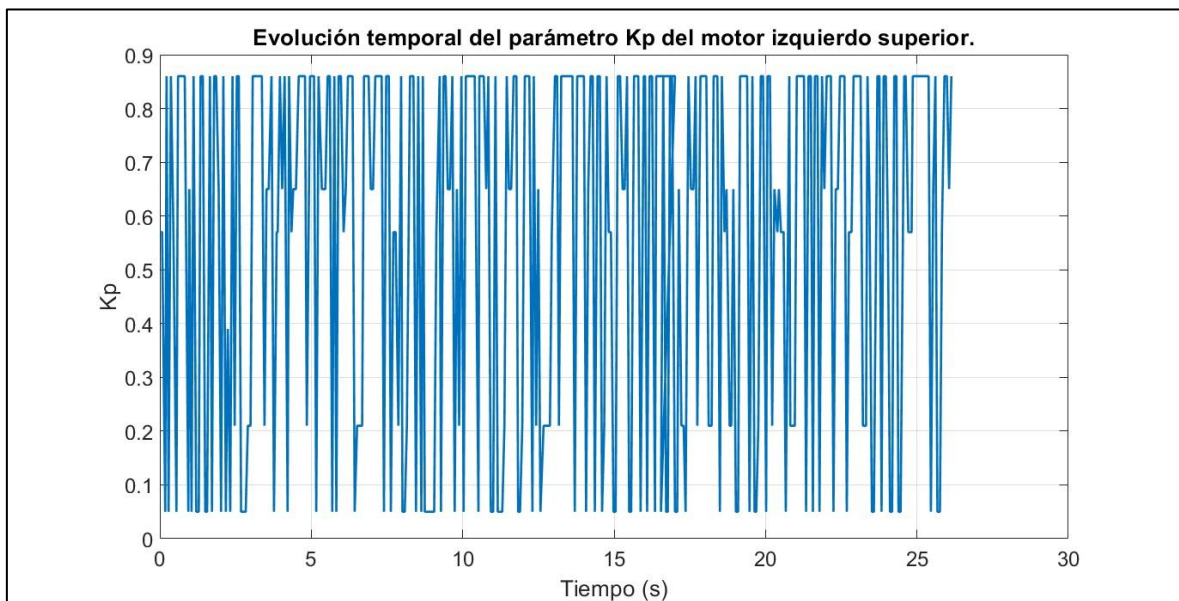


Gráfico 181. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.

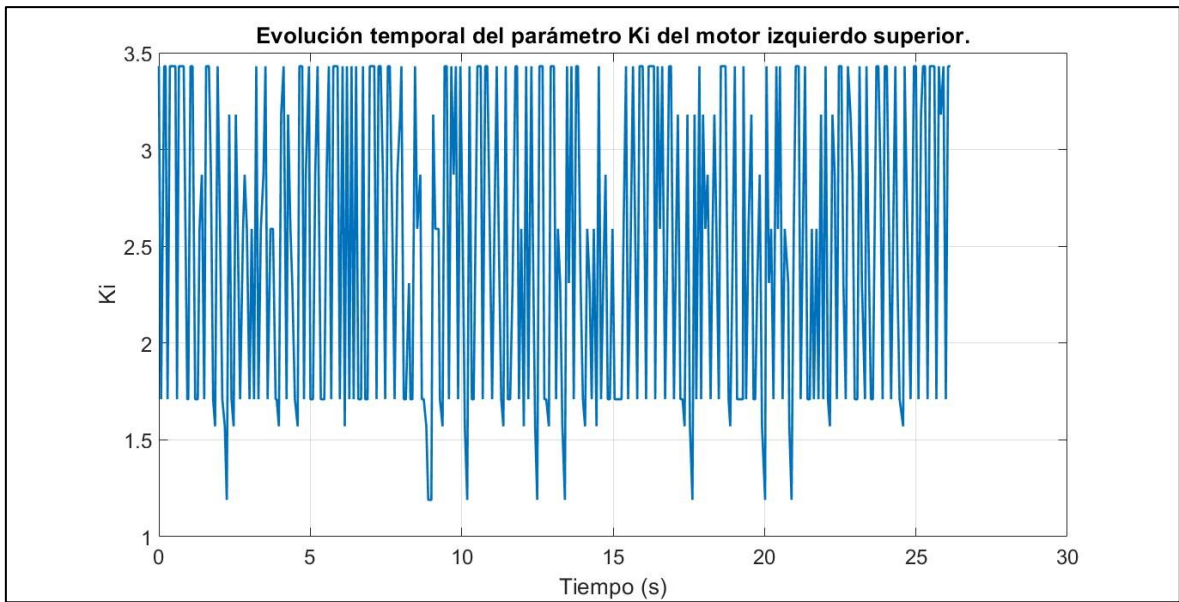


Gráfico 182. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.

- Motor derecho superior

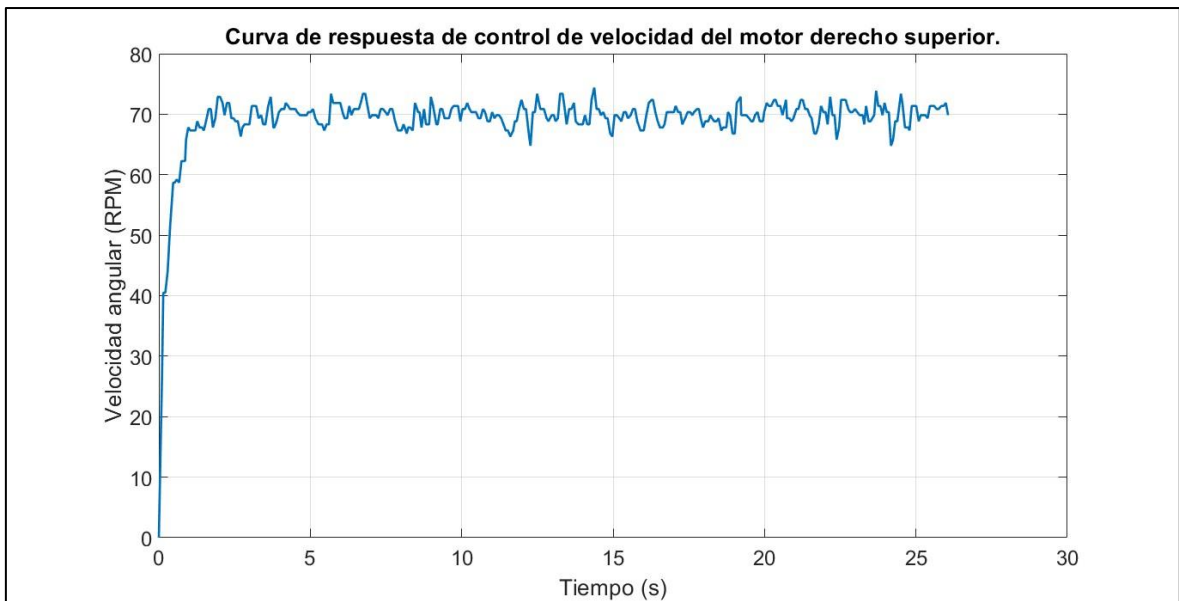
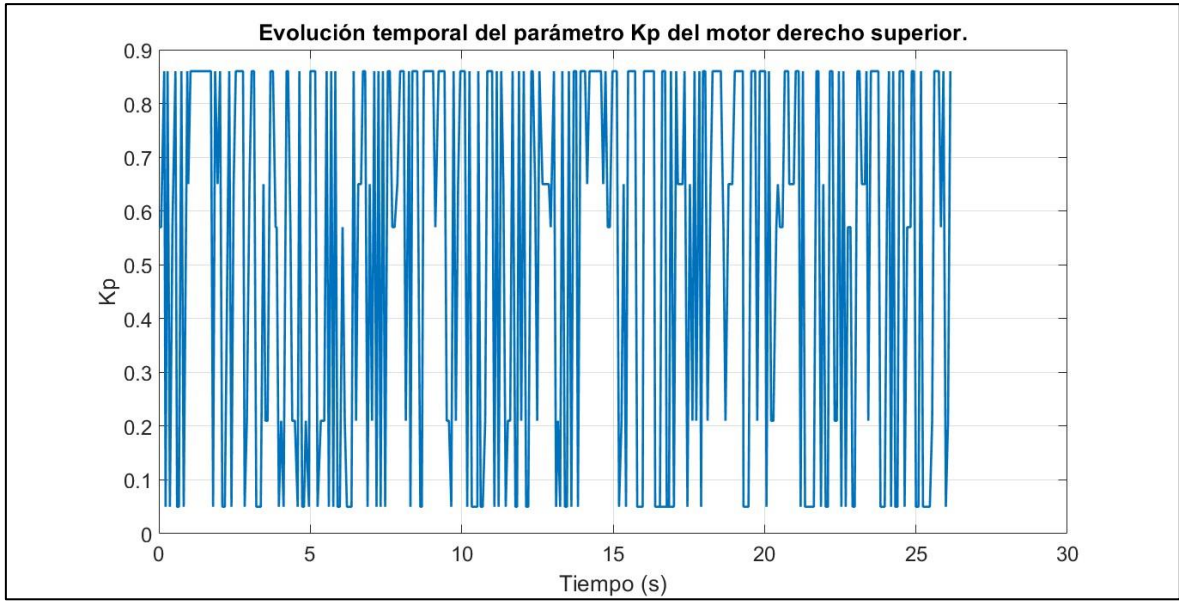
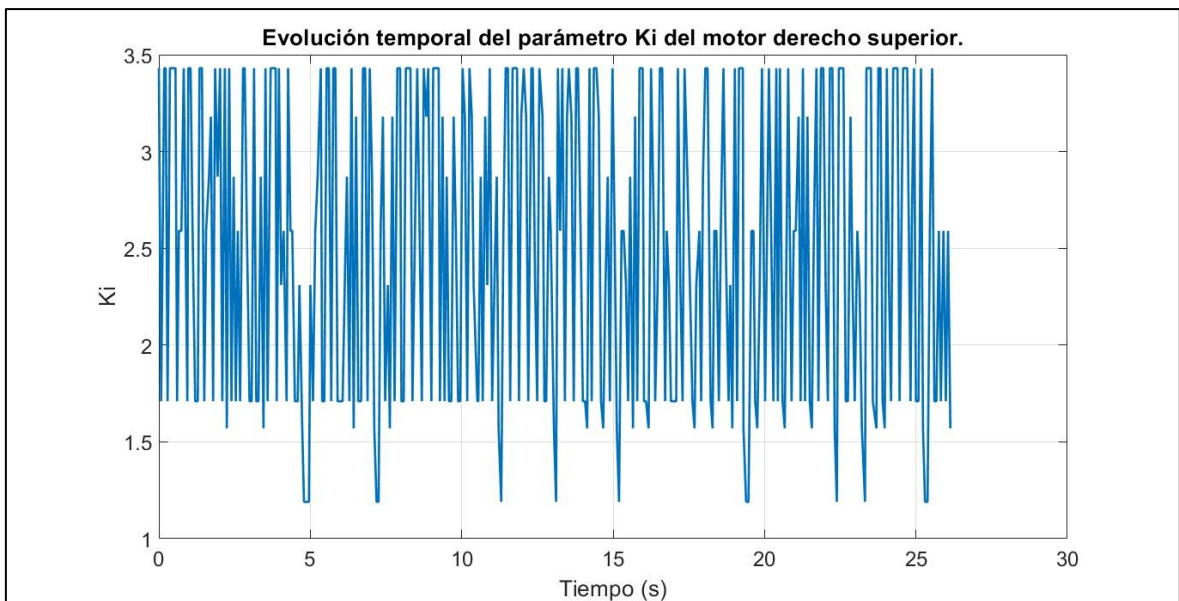


Gráfico 183. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.



*Gráfico 184. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.*



*Gráfico 185. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.*

- Motor derecho inferior

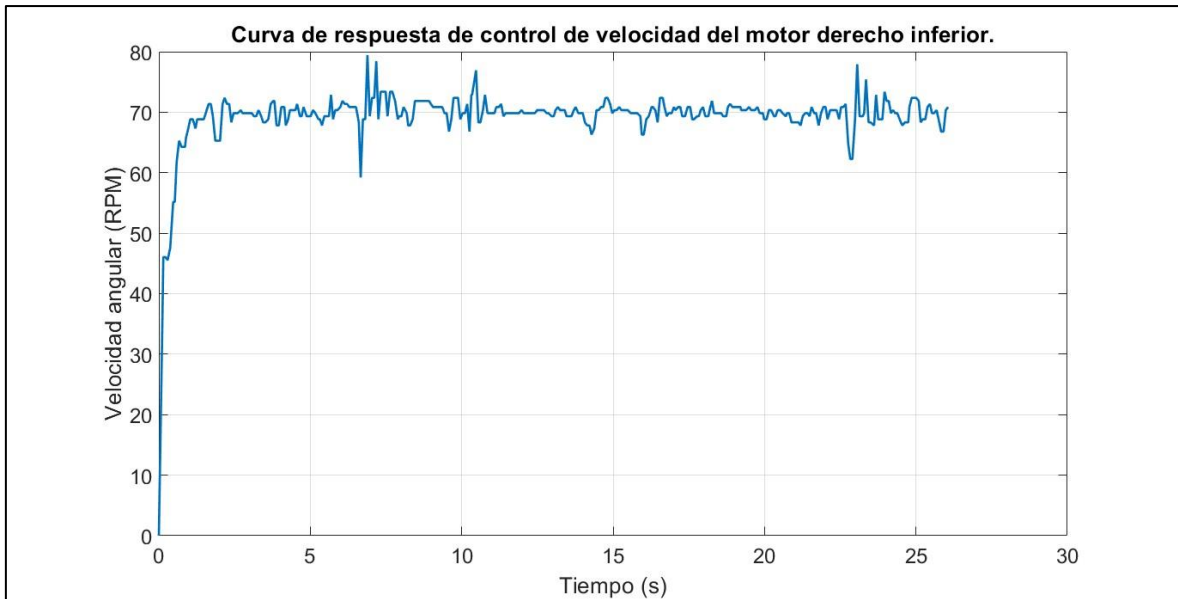


Gráfico 186. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

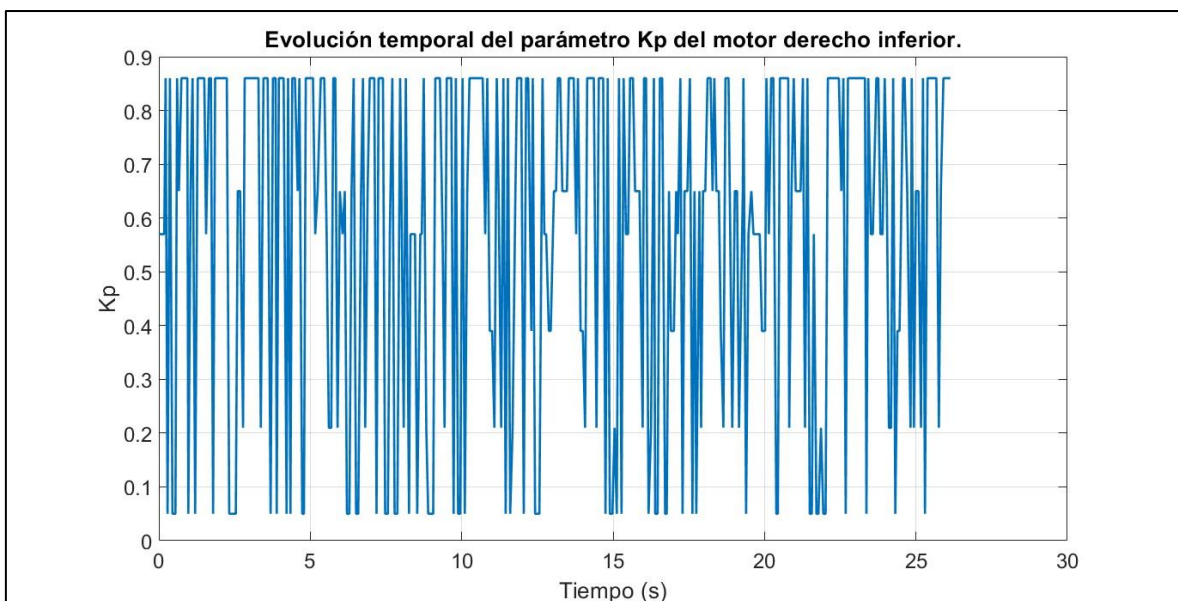


Gráfico 187. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

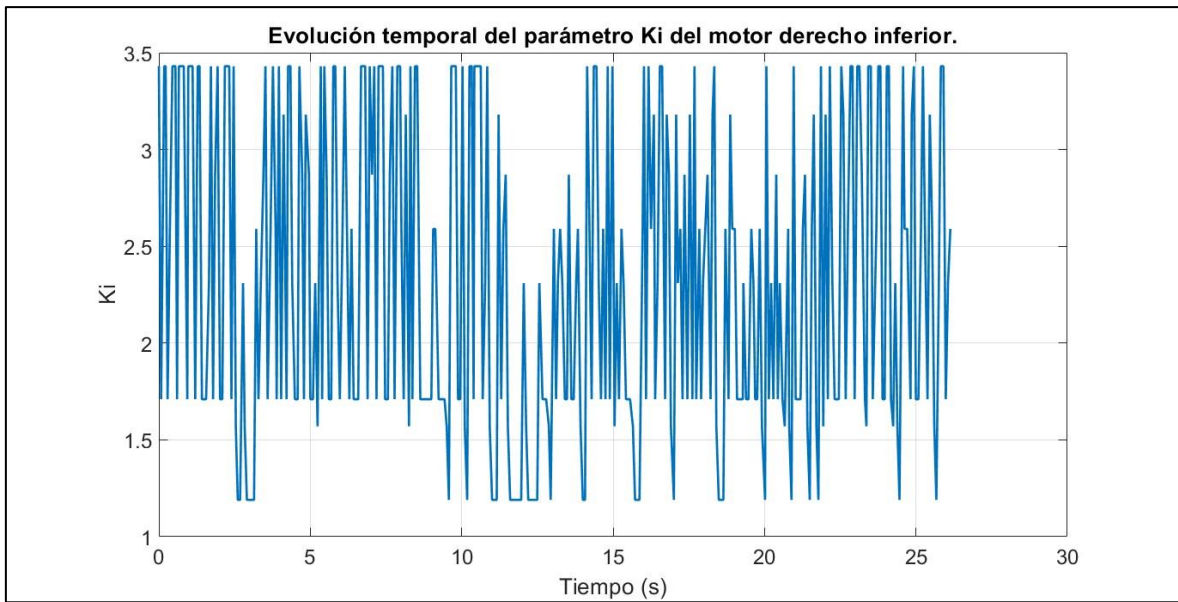


Gráfico 188. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

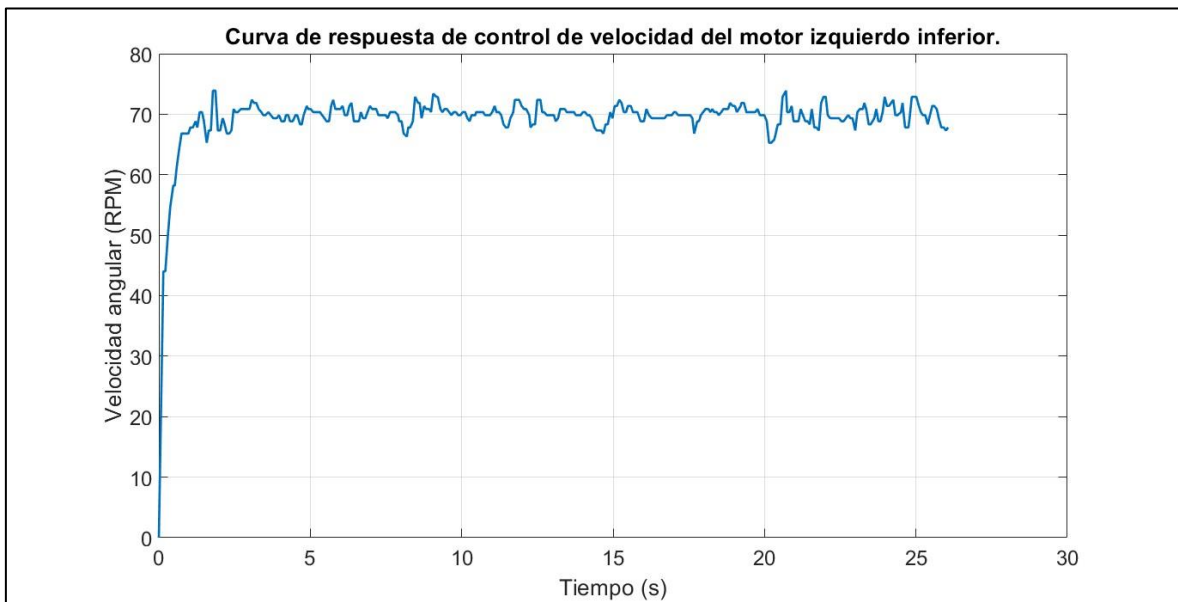


Gráfico 189. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

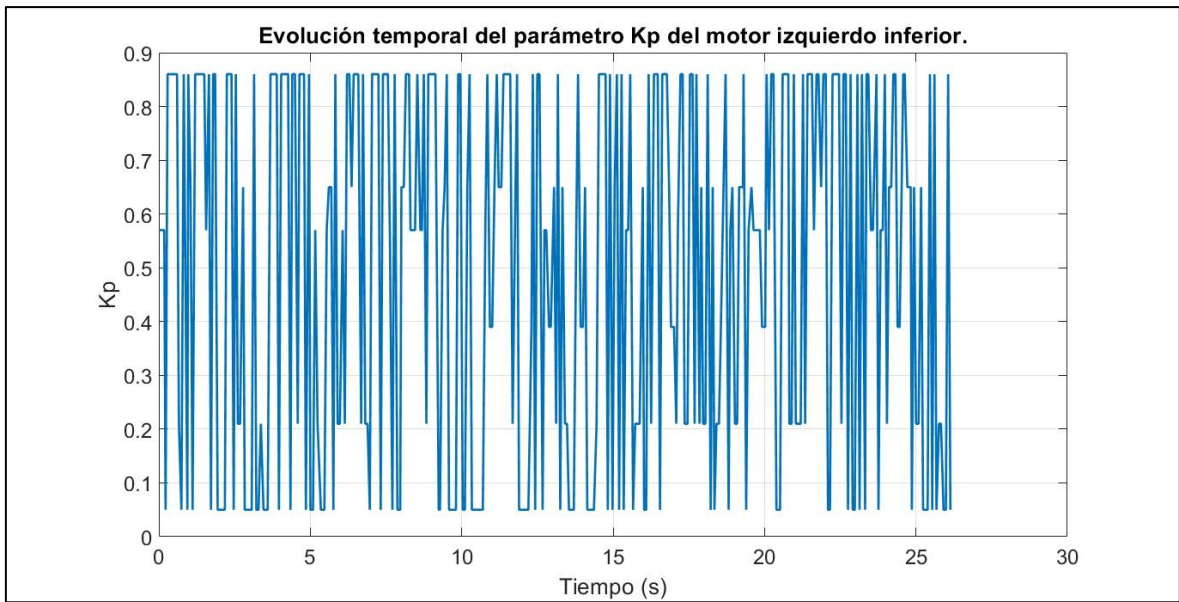


Gráfico 190. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

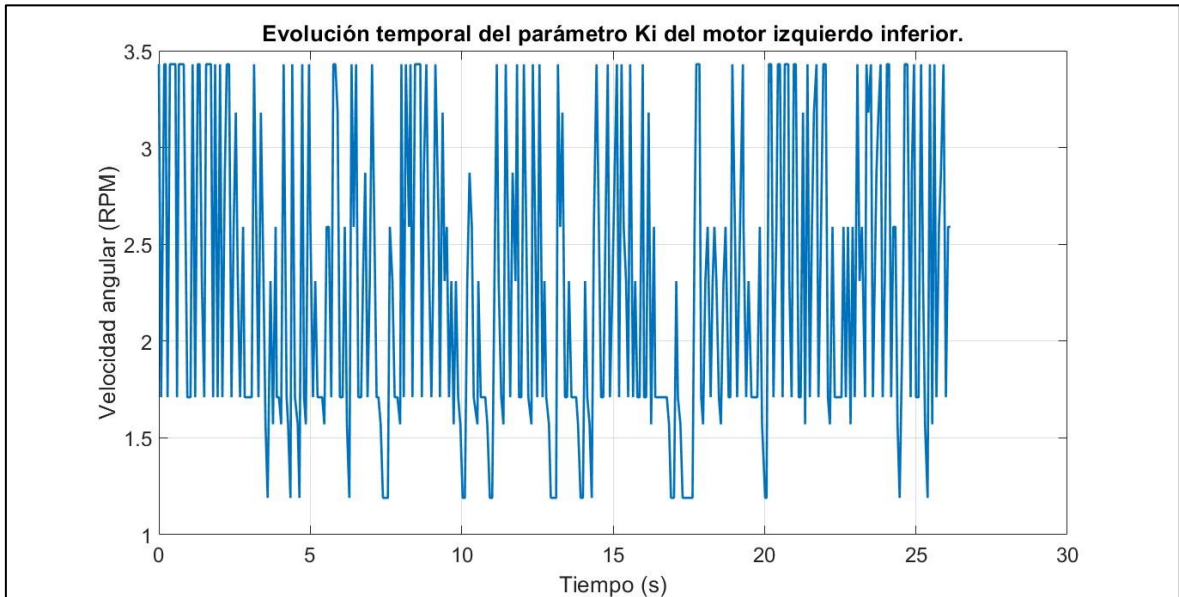


Gráfico 191. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

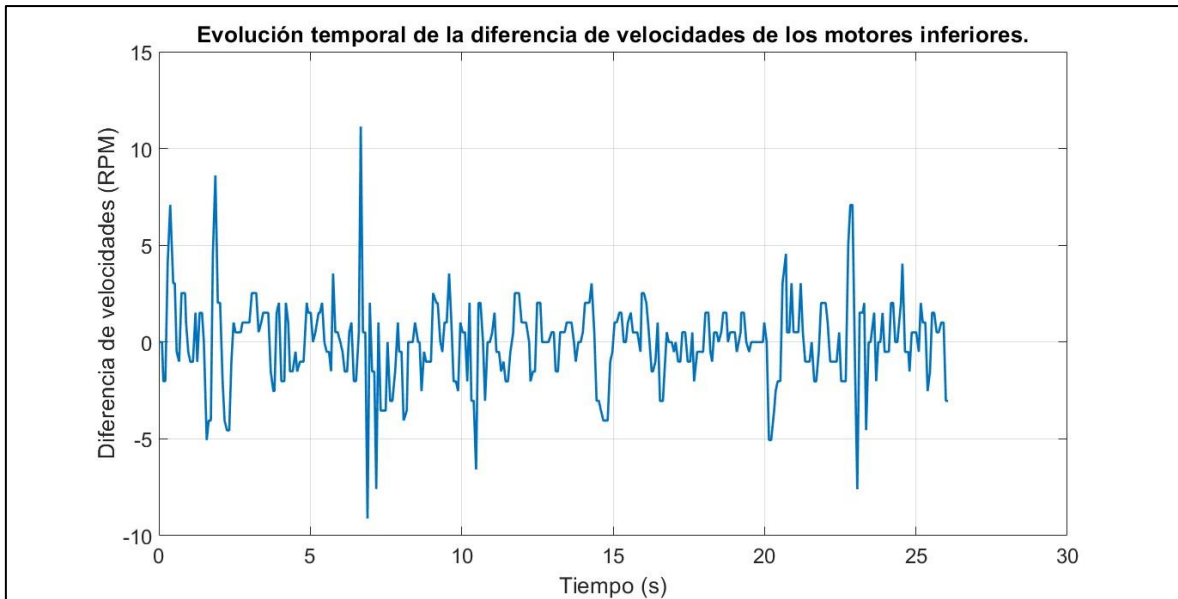


Gráfico 192. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

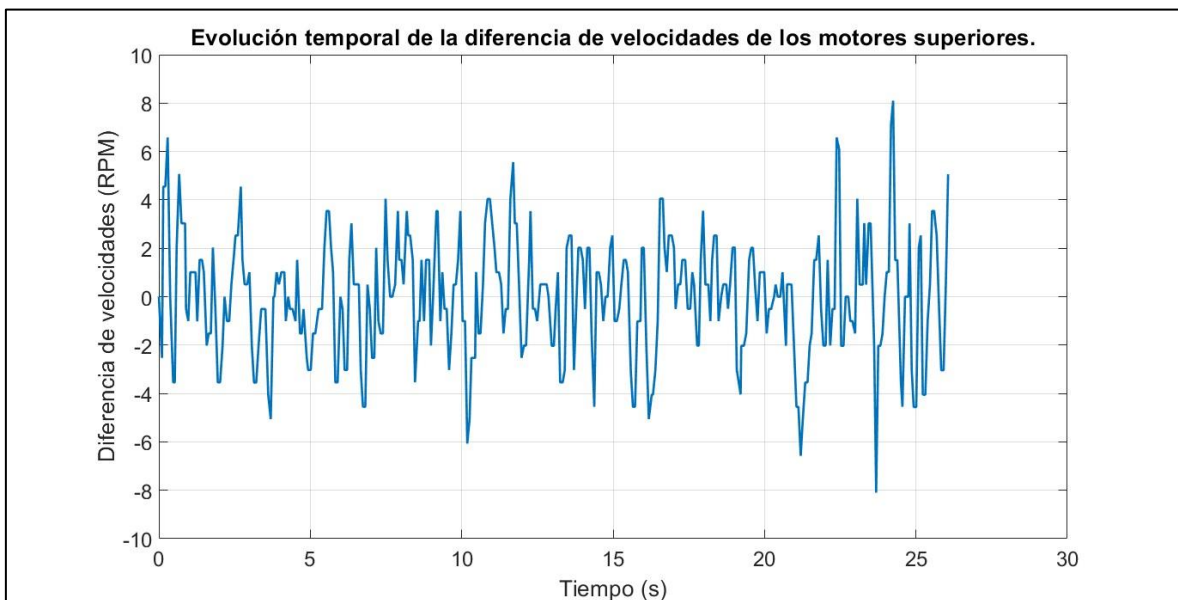


Gráfico 193. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.



- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=70 RPM, N° zonas=7										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	$\Delta w$ prom (RPM)
MOTOR 1	0.972	0.104	0.671	2.249	7.714	1.548	2.213	0.556	2.503	-0.032
MOTOR 2	0.898	0.103	0.747	1.646	6.271	1.342	1.918	0.526	2.481	
MOTOR 3	0.897	0.102	0.587	1.645	13.5	1.25	1.786	0.577	2.314	-0.027
MOTOR 4	0.749	0.105	0.672	1.427	5.557	1.131	1.615	0.493	2.289	
Promedio	0.879	0.104	0.669	1.742	8.261	1.318	1.883	0.538	2.397	

Tabla 32. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 70RPM autosintonizados con 7 zonas.

c) Setpoint por motor de 80 RPM

- Motor izquierdo superior

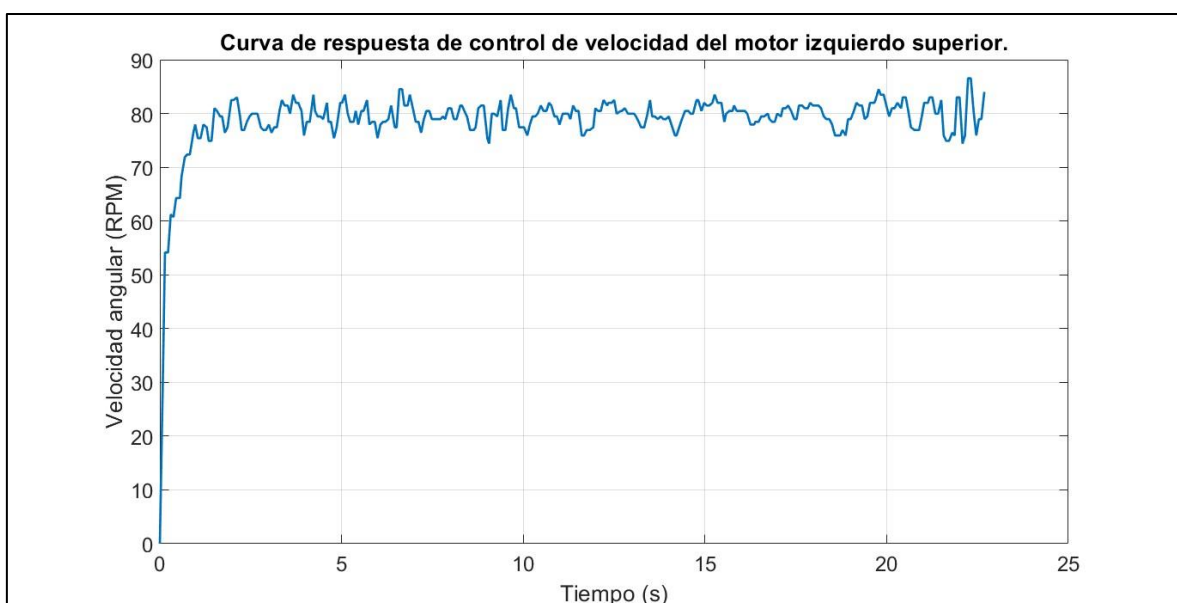
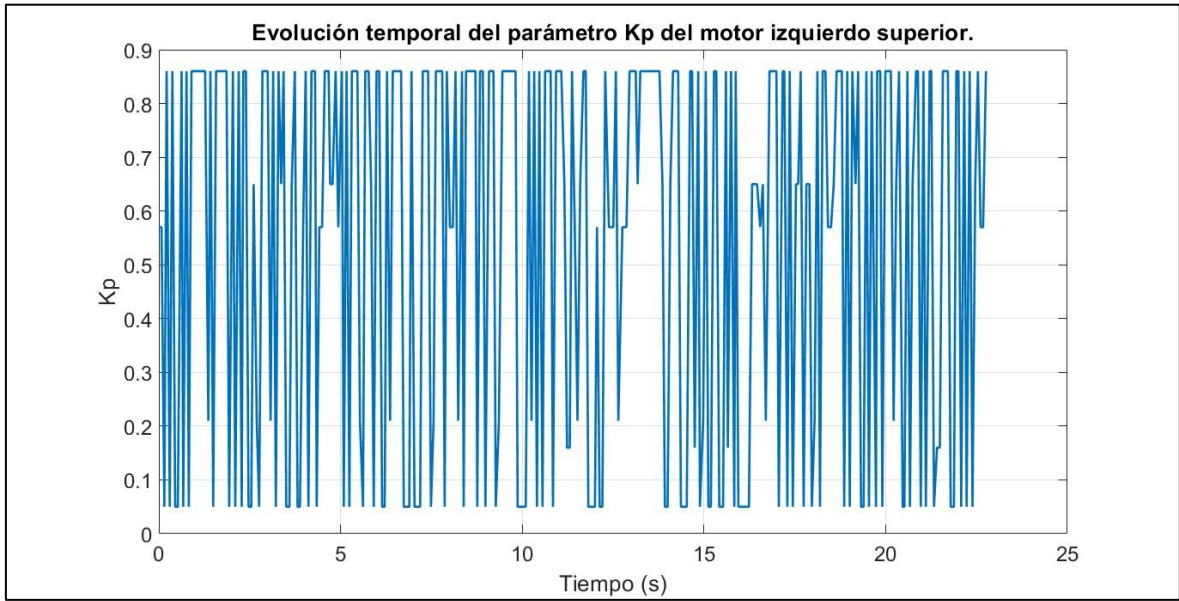
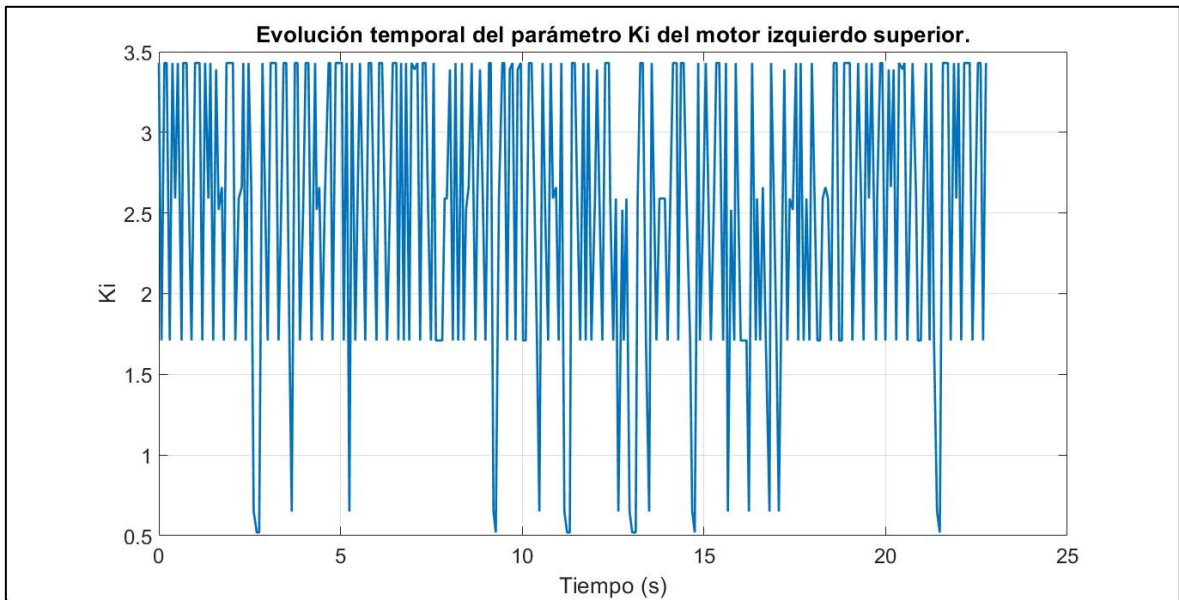


Gráfico 194. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.



*Gráfico 195. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.*



*Gráfico 196. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.*

- Motor derecho superior

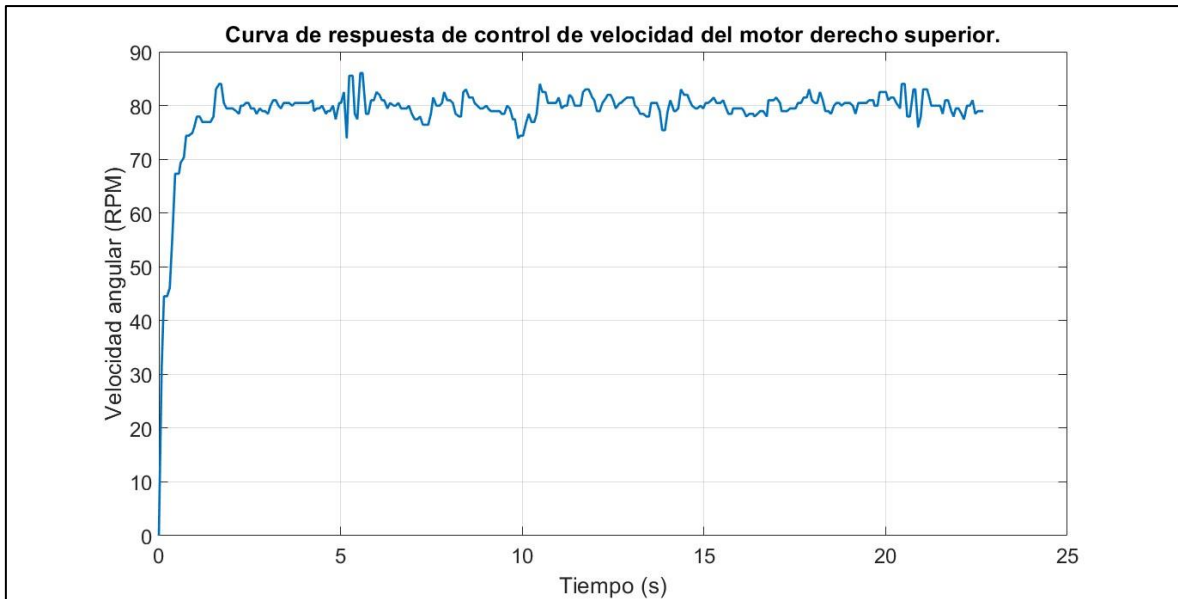


Gráfico 197. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

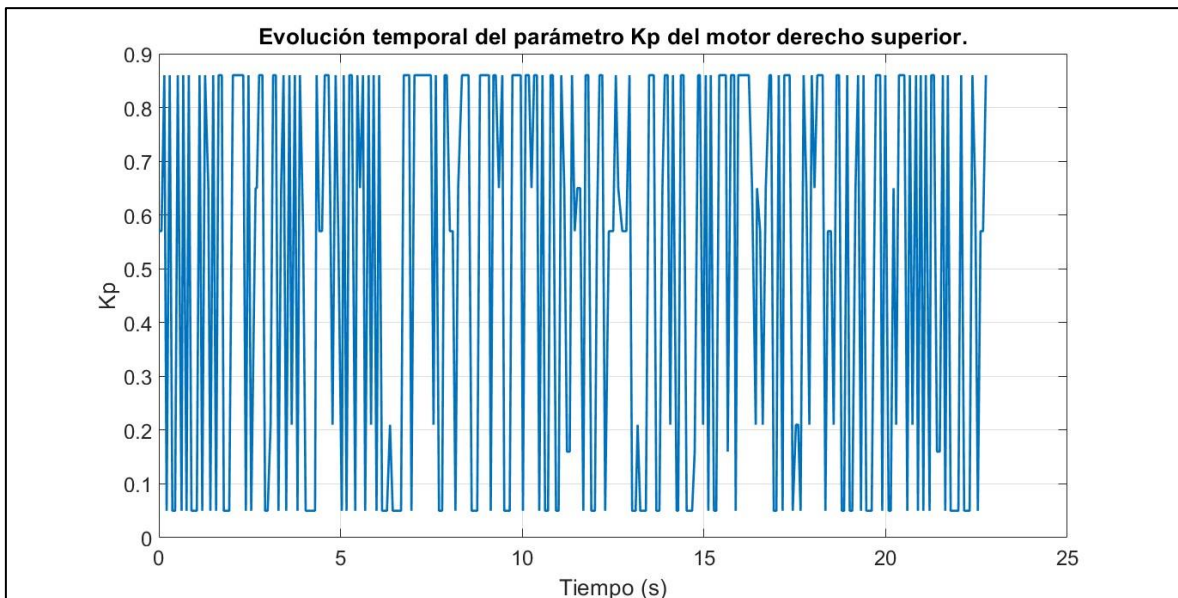


Gráfico 198. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

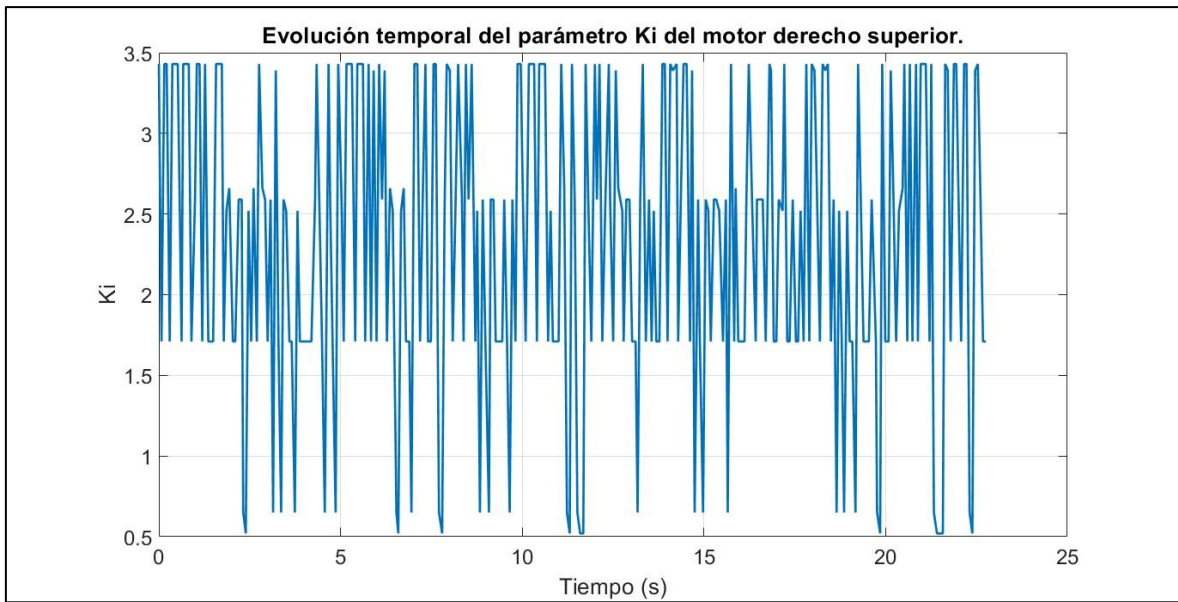


Gráfico 199. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

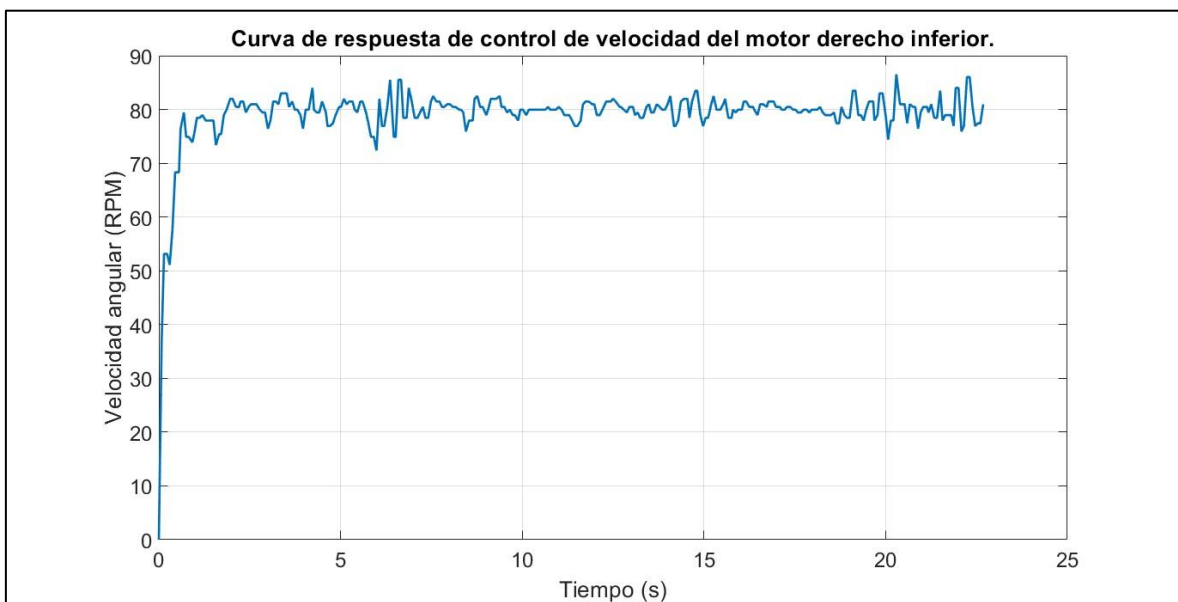


Gráfico 200. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

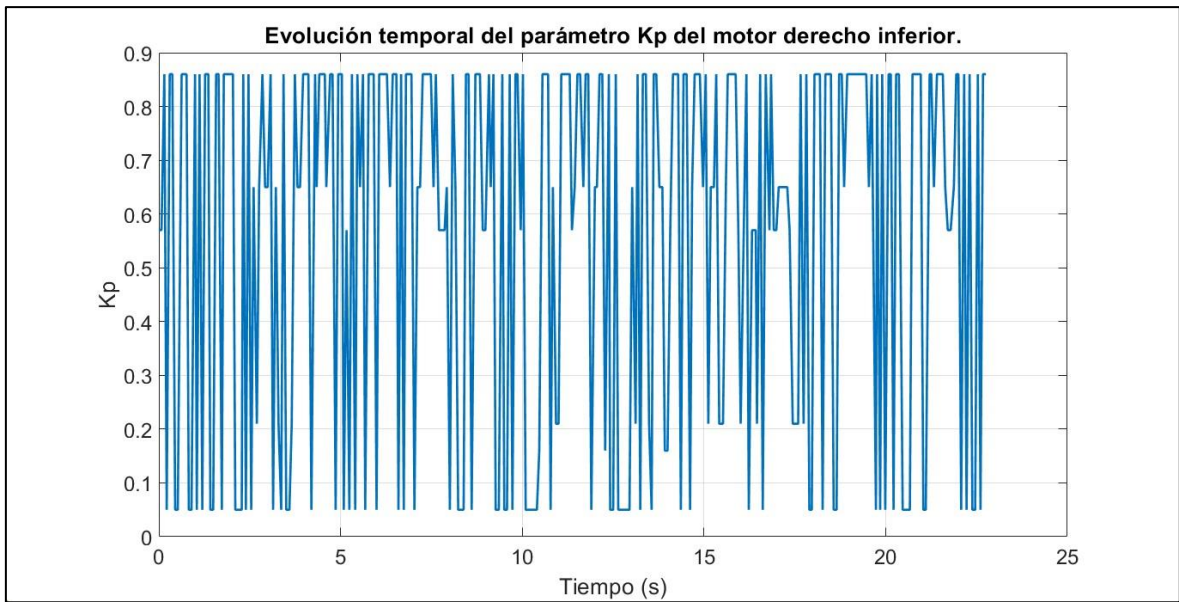


Gráfico 201. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

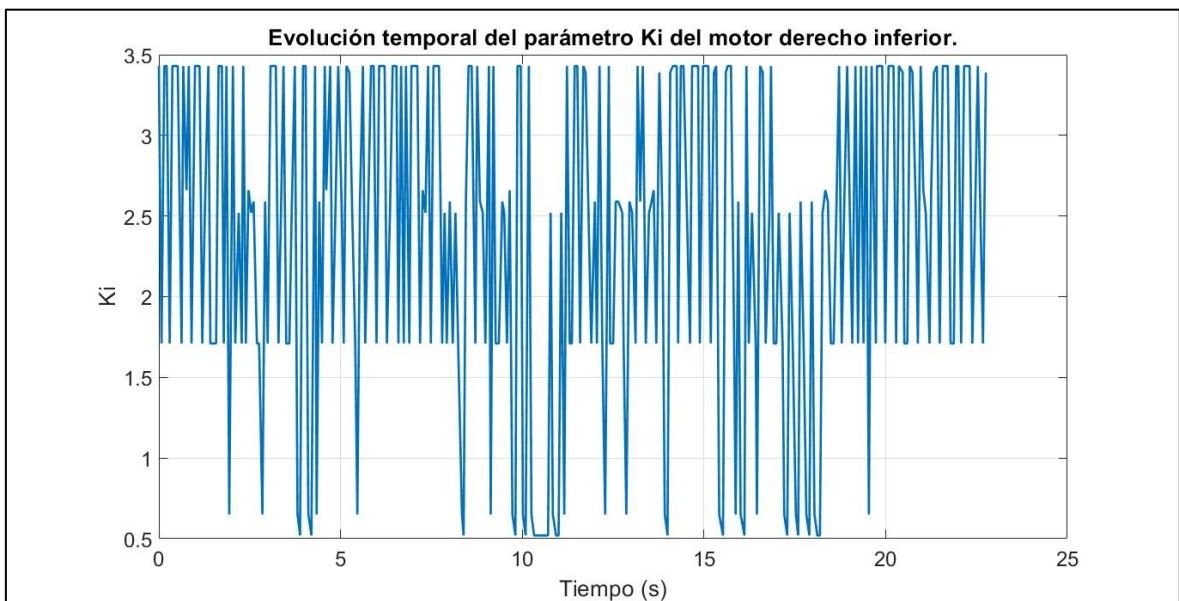


Gráfico 202. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

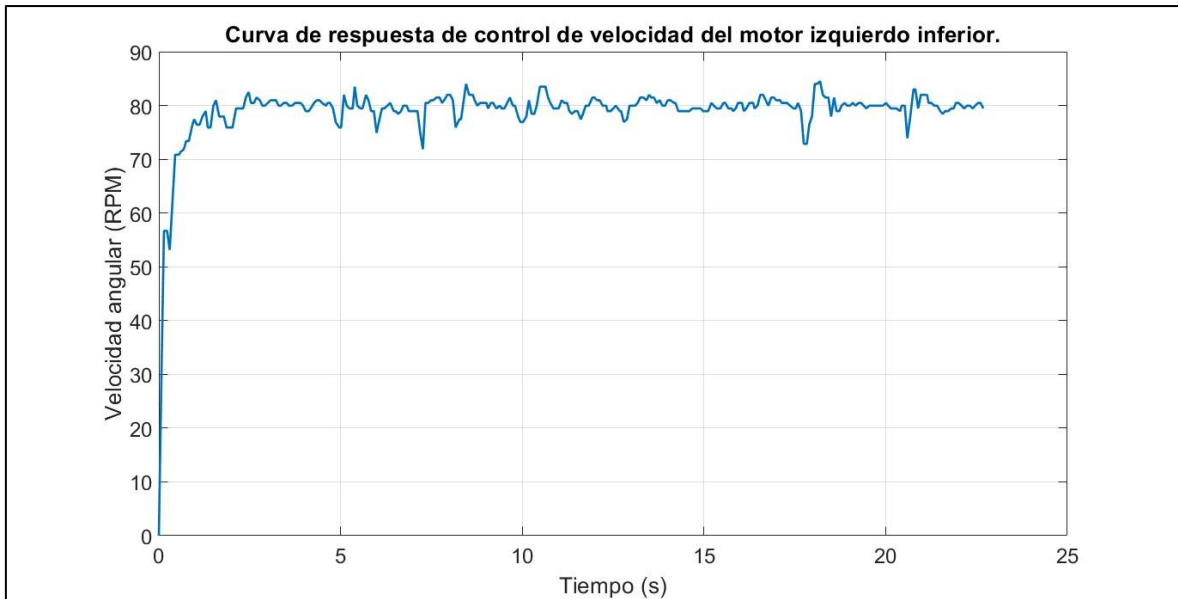


Gráfico 203. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

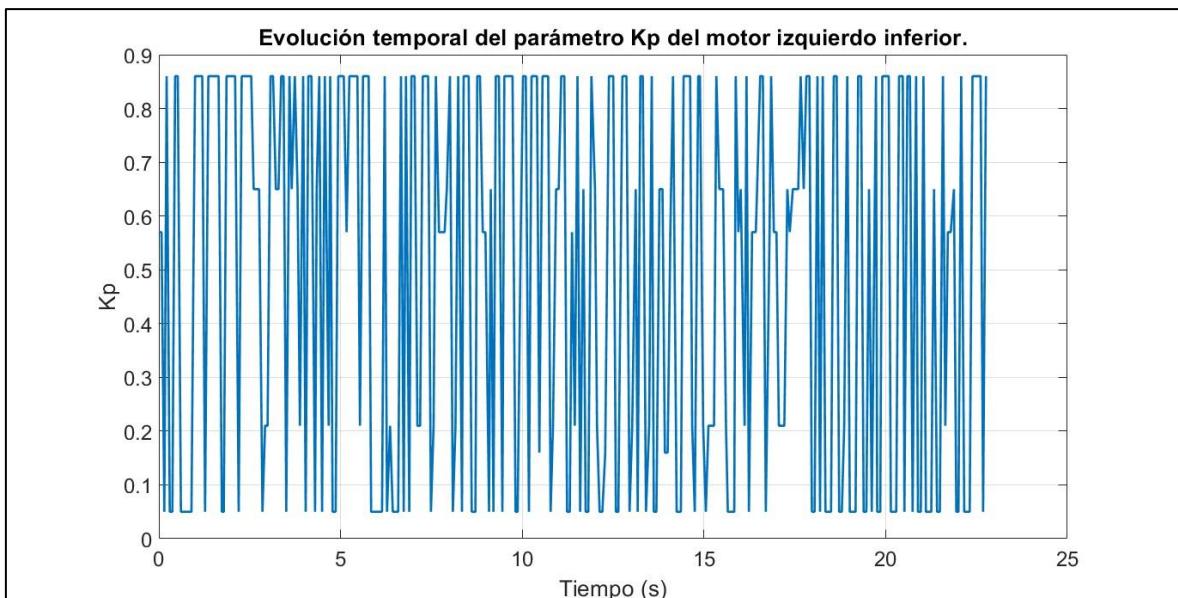


Gráfico 204. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

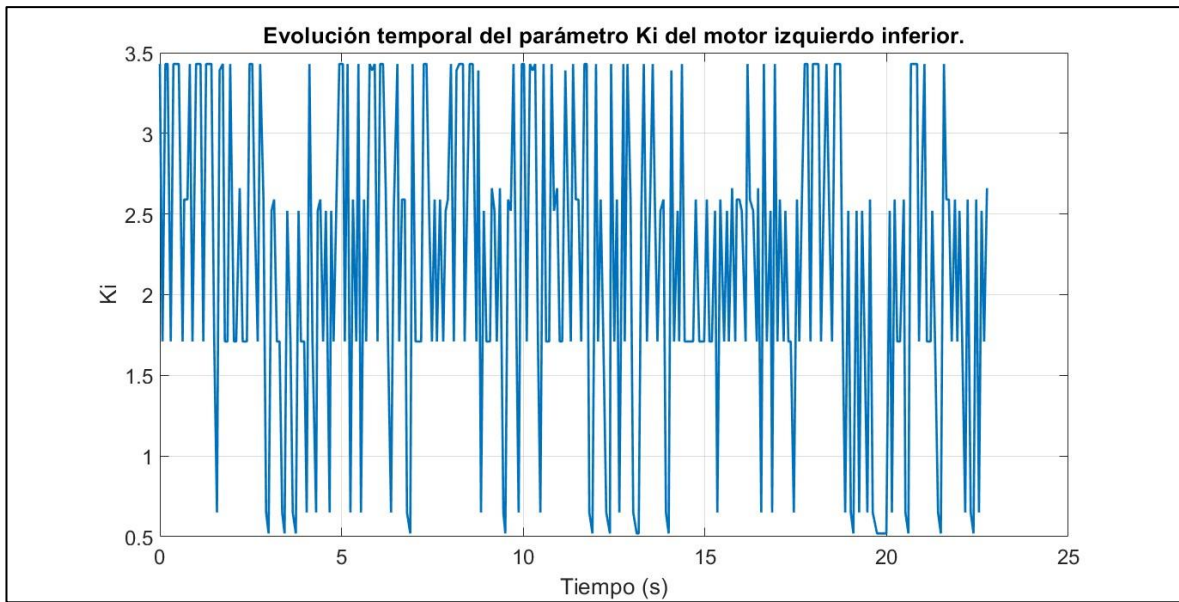


Gráfico 205. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

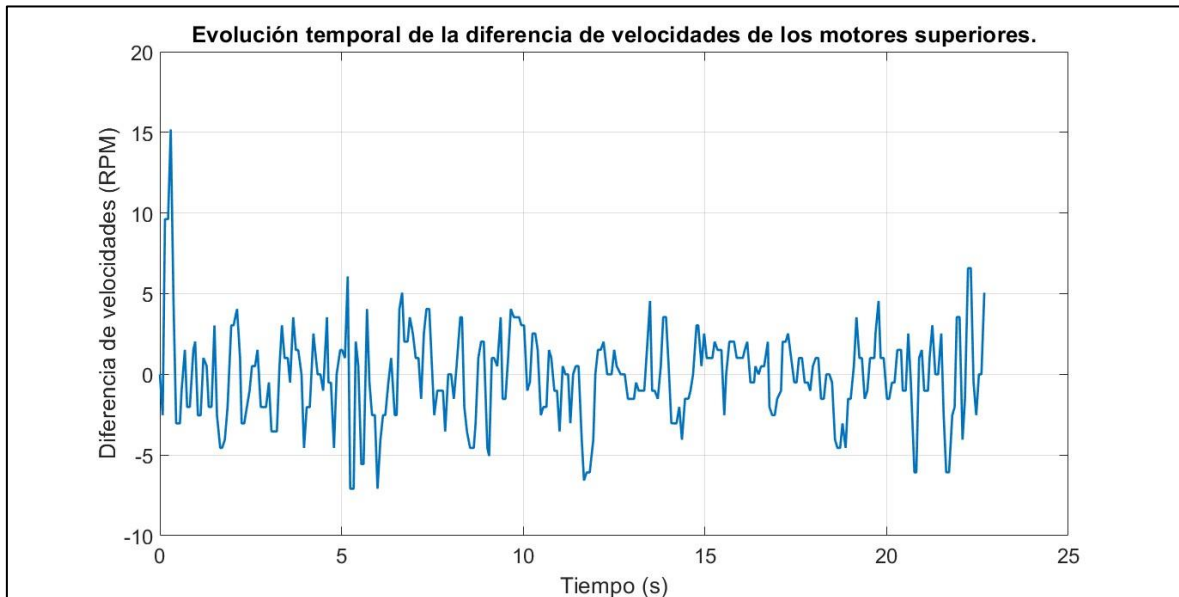


Gráfico 206. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

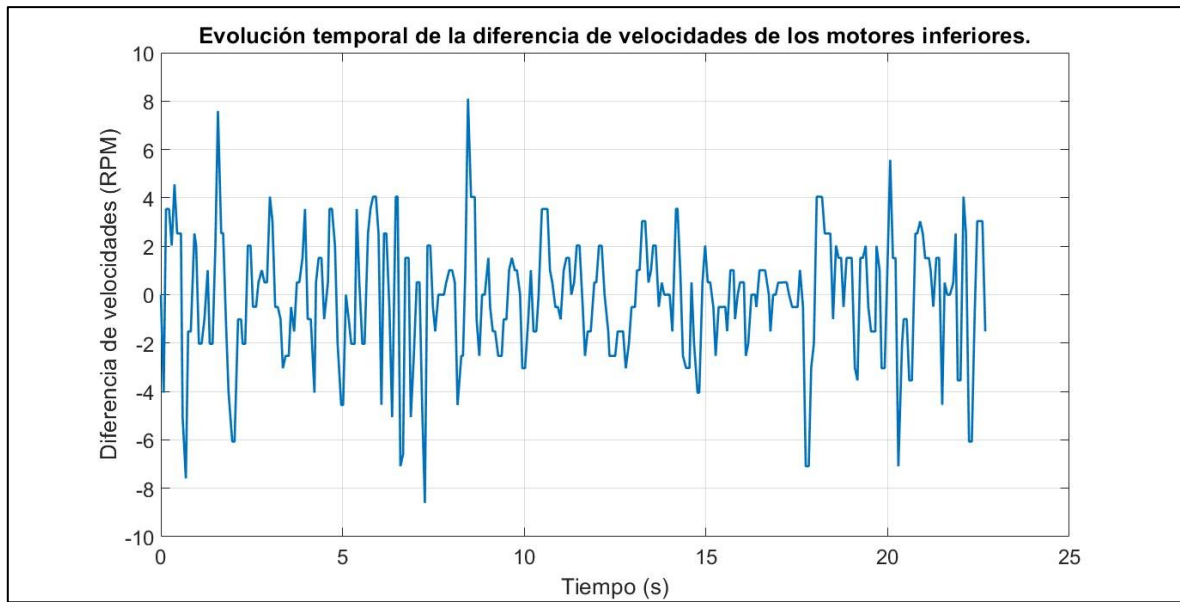


Gráfico 207. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=80 RPM, N° zonas=7										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	$\Delta w$ prom (RPM)
MOTOR 1	1.422	0.078	0.687	2.124	8.175	1.764	2.206	0.539	2.524	-0.129
MOTOR 2	0.972	0.078	0.689	1.661	7.538	1.371	1.714	0.499	2.326	
MOTOR 3	1.714	0.077	0.554	1.965	8.175	1.454	1.818	0.56	2.358	-0.105
MOTOR 4	2.027	0.079	0.687	2.47	5.638	1.091	1.363	0.489	2.179	
Promedio	1.534	0.078	0.654	2.055	7.382	1.420	1.775	0.522	2.347	

Tabla 33. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 80RPM autosintonizados con 7 zonas.



d) Setpoint por motor de 90 RPM

- Motor izquierdo superior

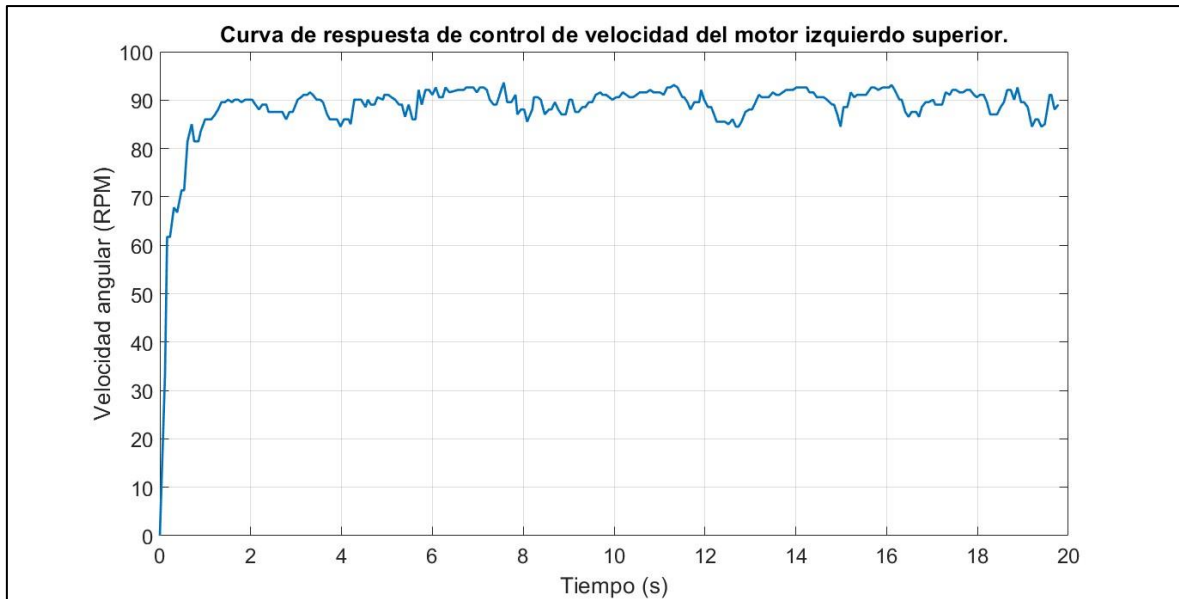


Gráfico 208. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo superior.

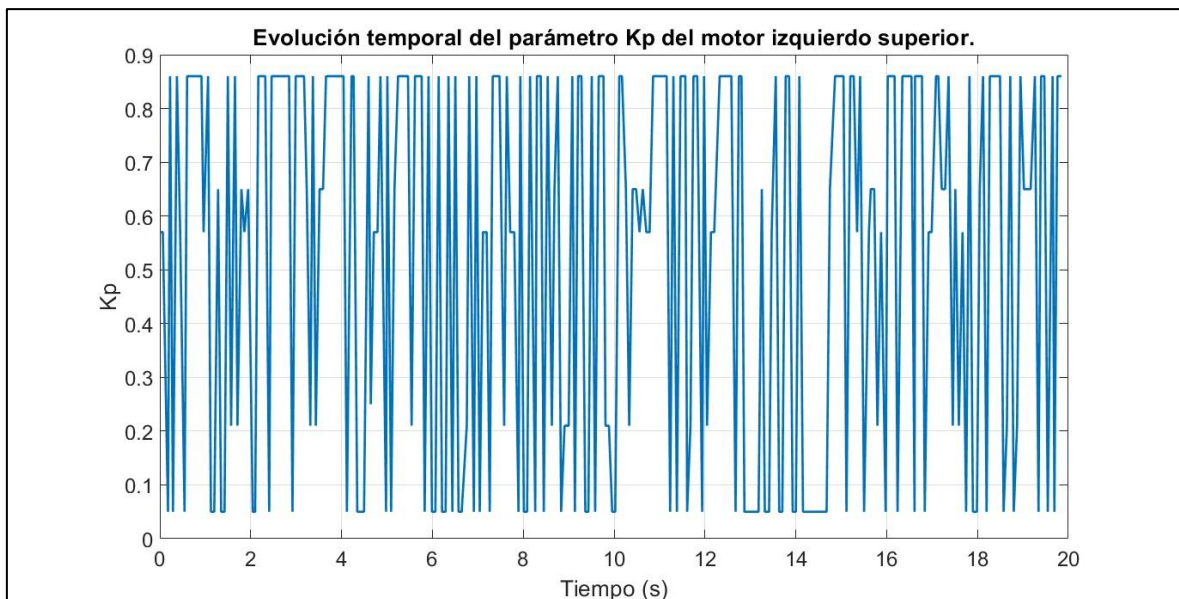


Gráfico 209. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo superior.

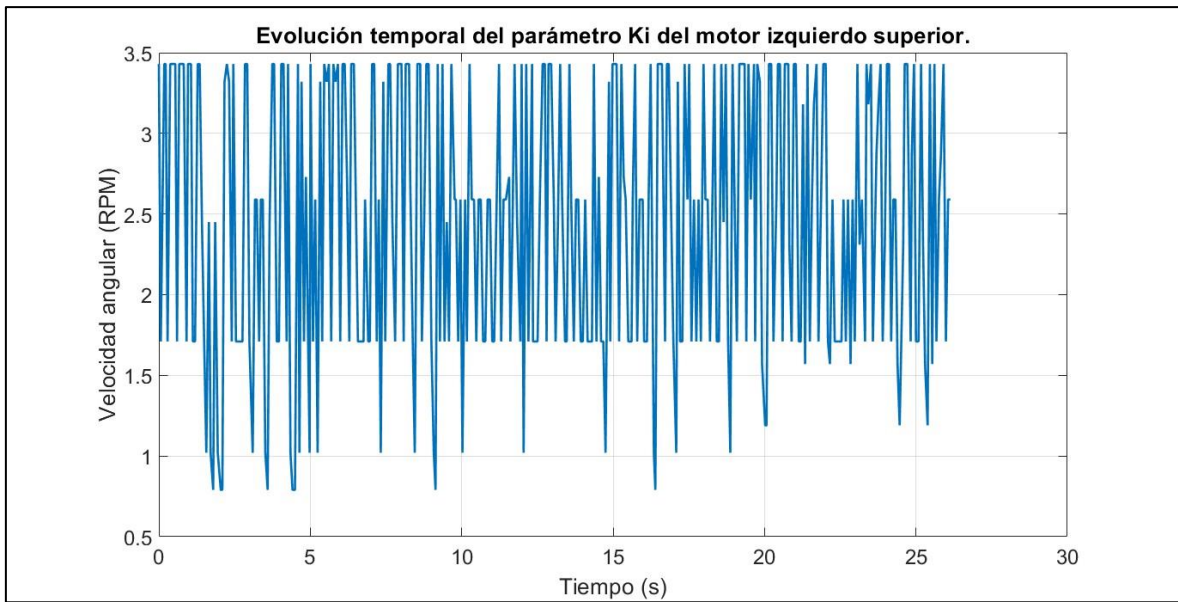


Gráfico 210. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo superior.

- Motor derecho superior

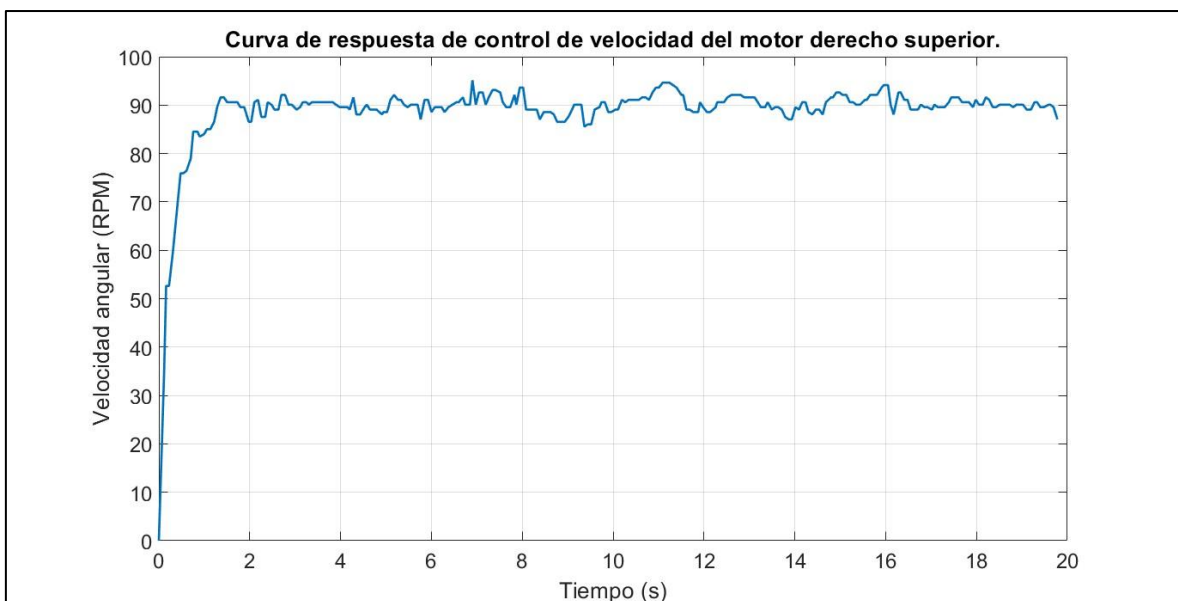


Gráfico 211. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho superior.

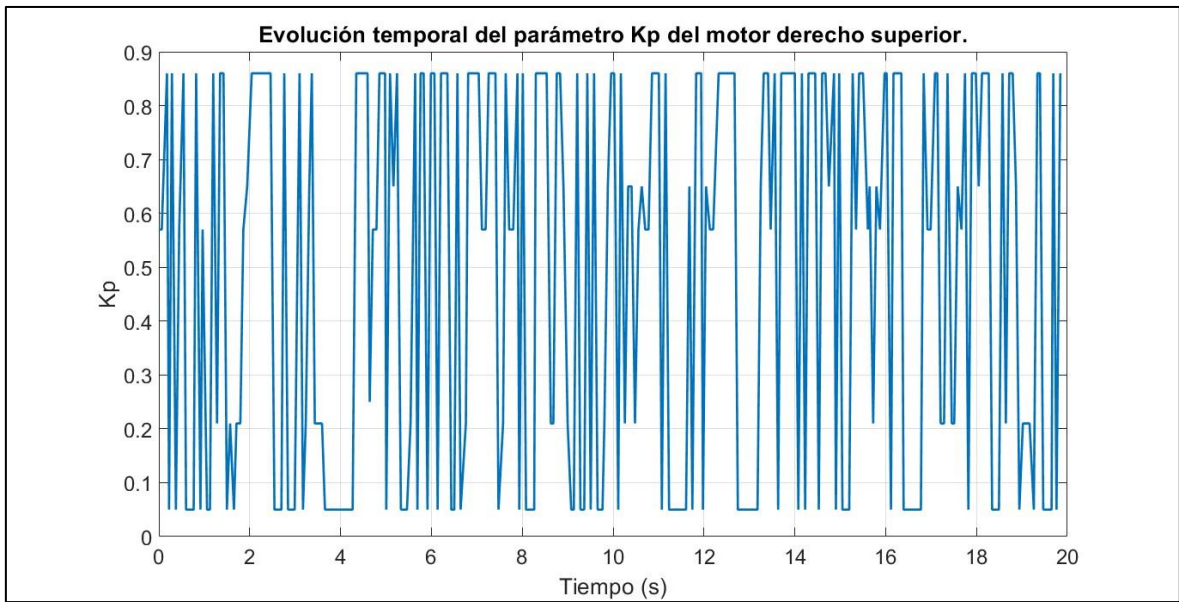


Gráfico 212. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho superior.

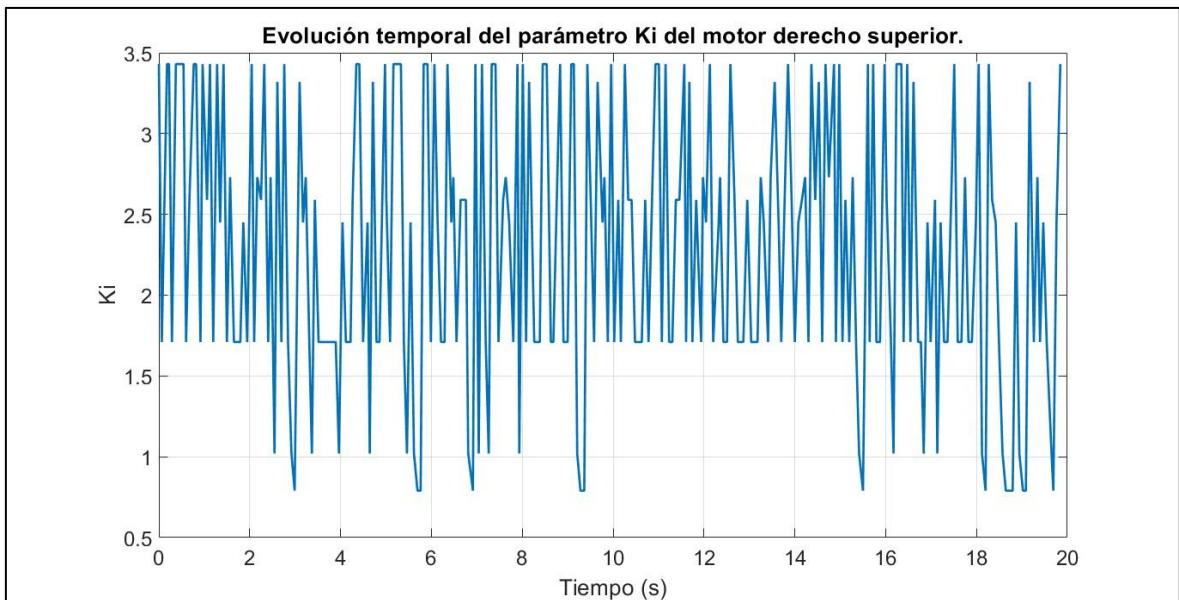


Gráfico 213. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho superior.

- Motor derecho inferior

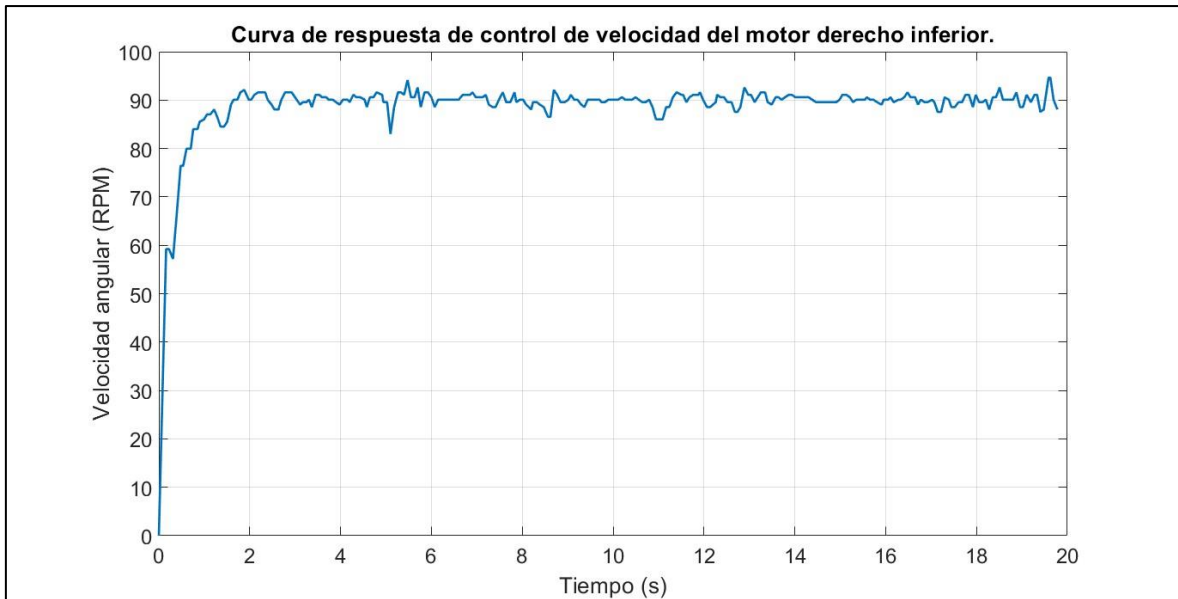


Gráfico 214. Curva de respuesta de control de velocidad del motor derecho inferior.

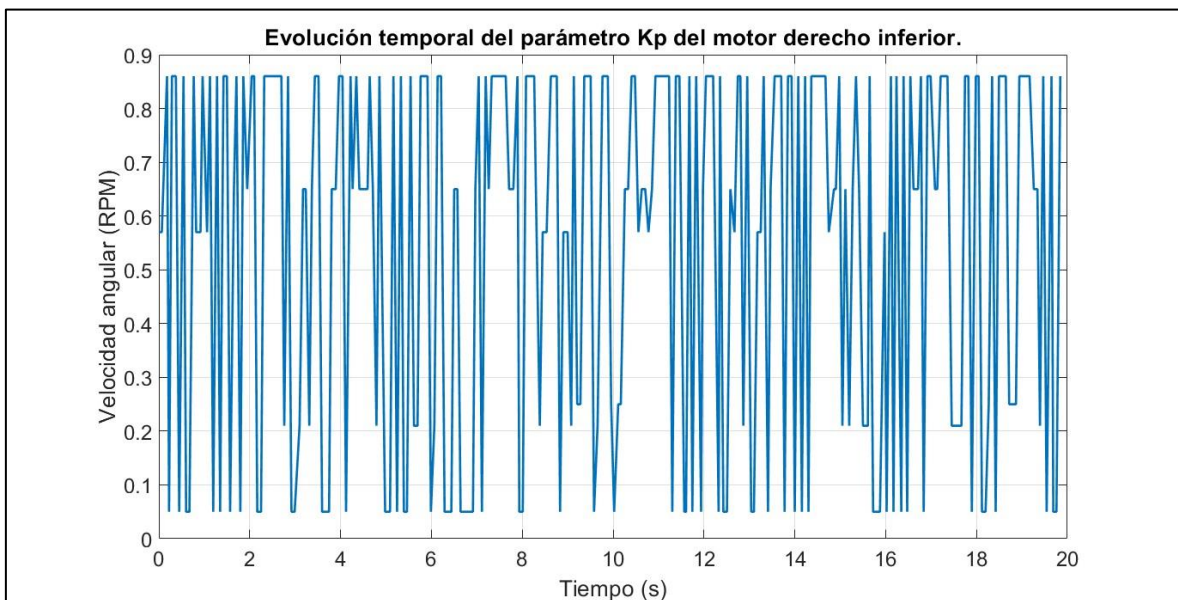


Gráfico 215. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor derecho inferior.

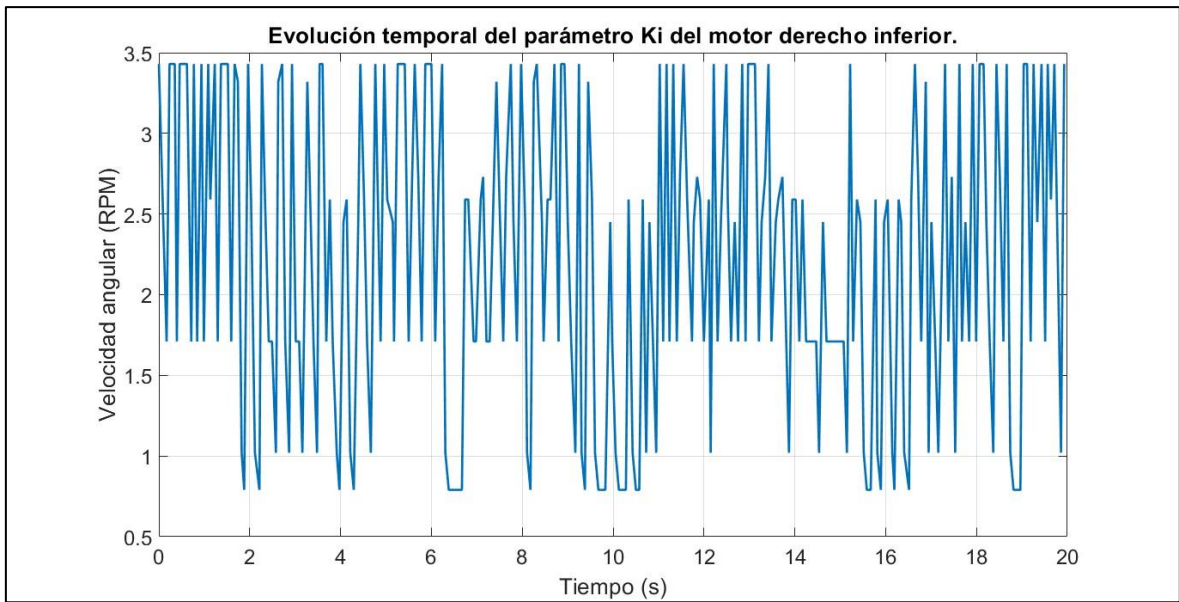


Gráfico 216. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor derecho inferior.

- Motor izquierdo inferior

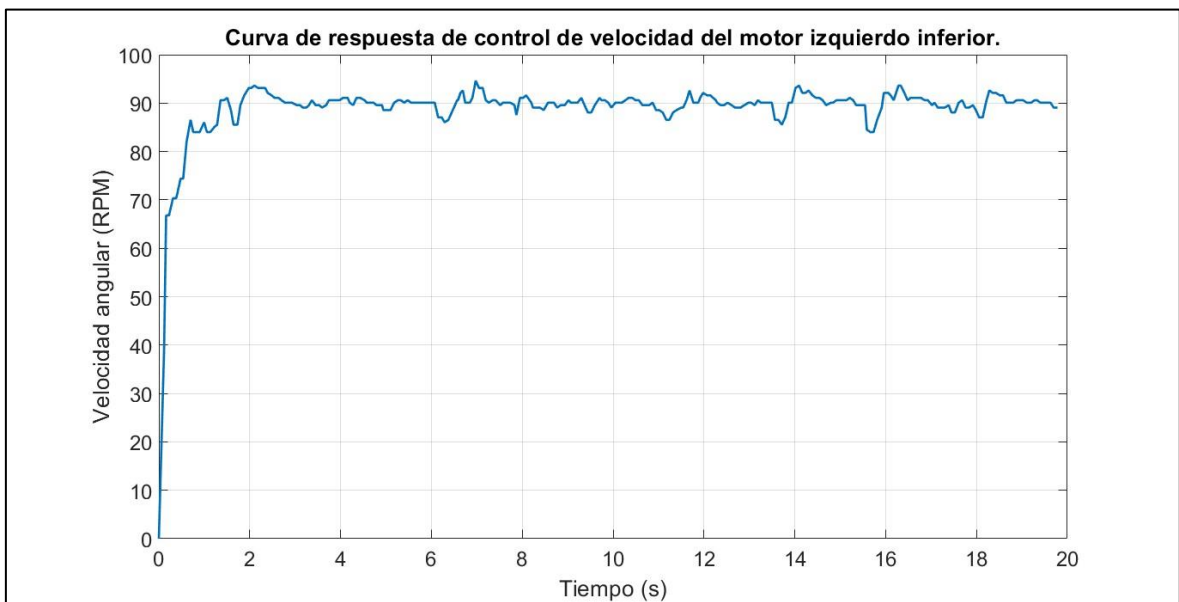


Gráfico 217. Curva de respuesta de control de velocidad del motor izquierdo inferior.

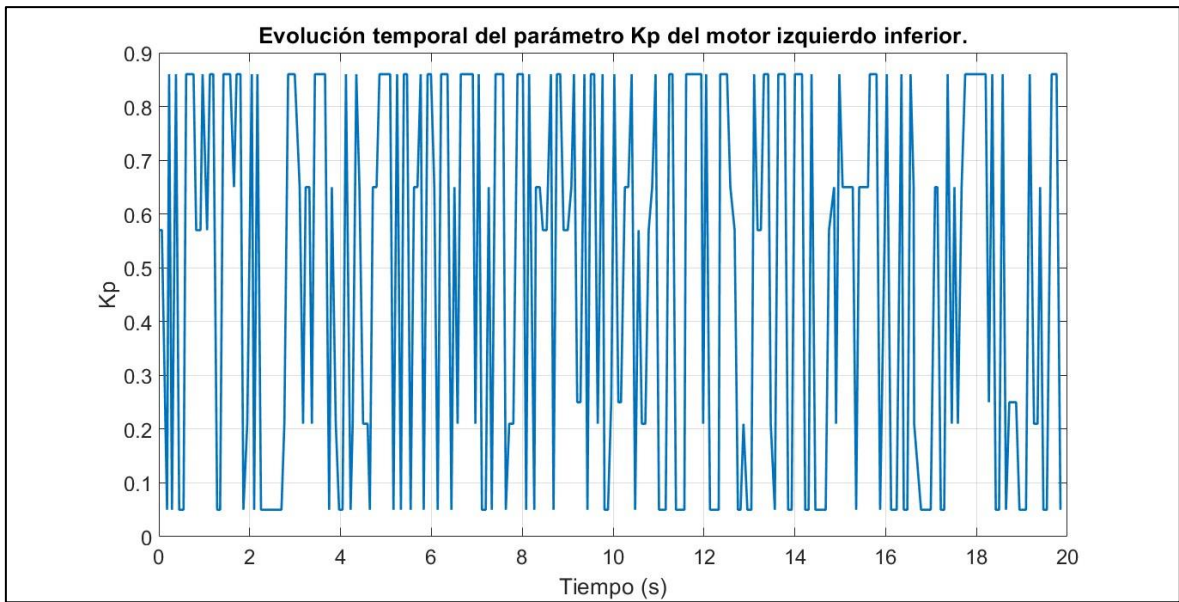


Gráfico 218. Evolución temporal del parámetro  $K_p$  del motor izquierdo inferior.

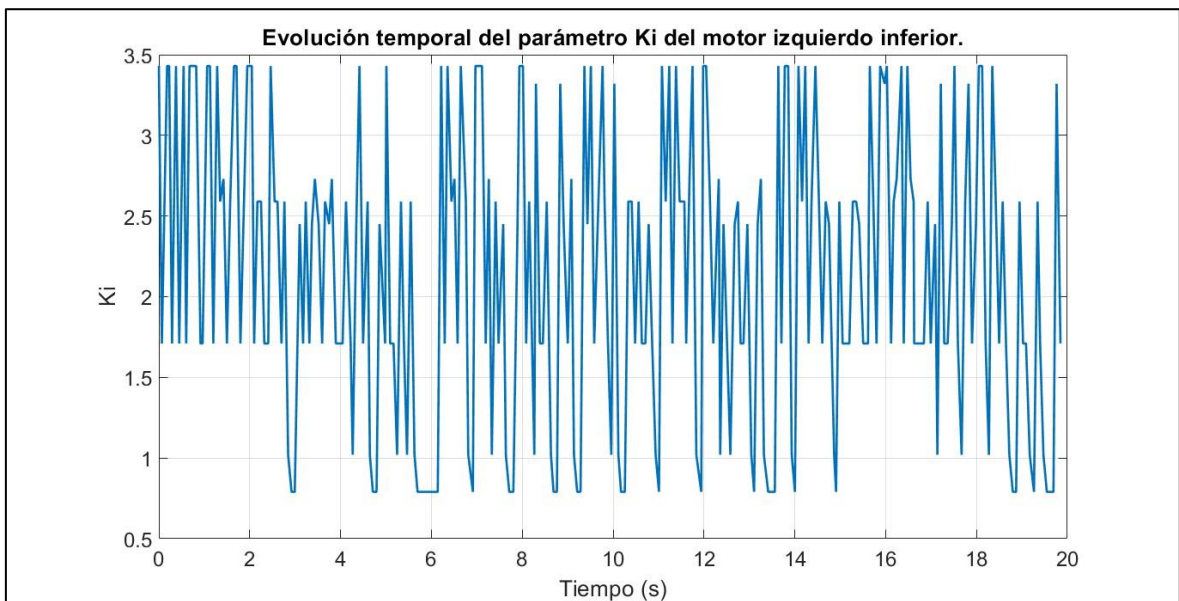


Gráfico 219. Evolución temporal del parámetro  $K_i$  del motor izquierdo inferior.

- Diferencia de velocidades del robot diferencial

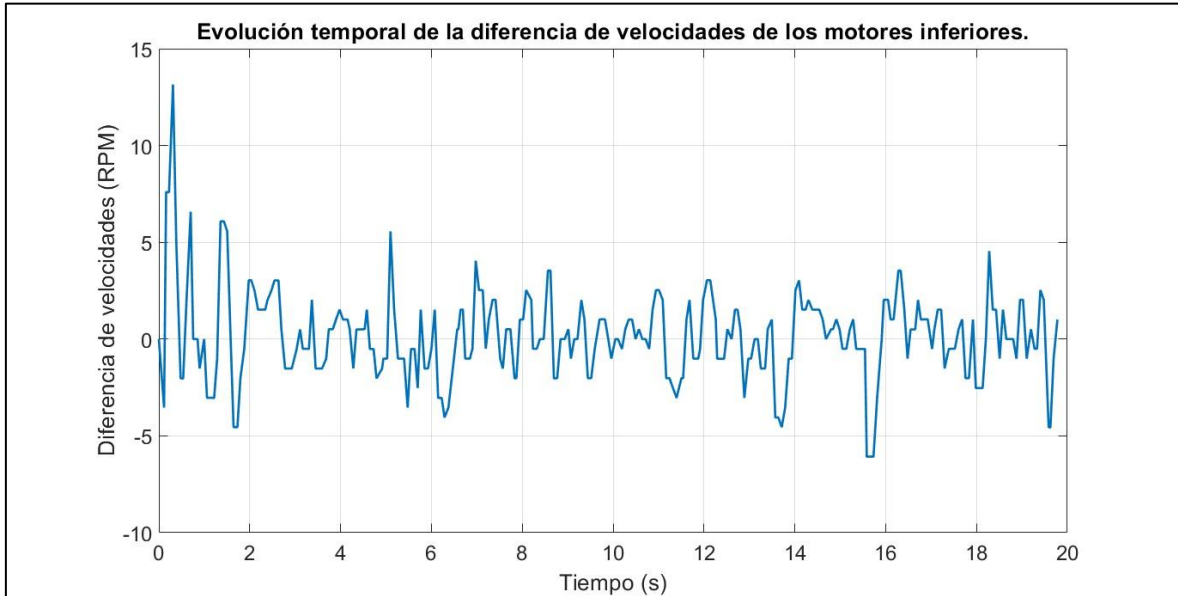


Gráfico 220. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores inferiores.

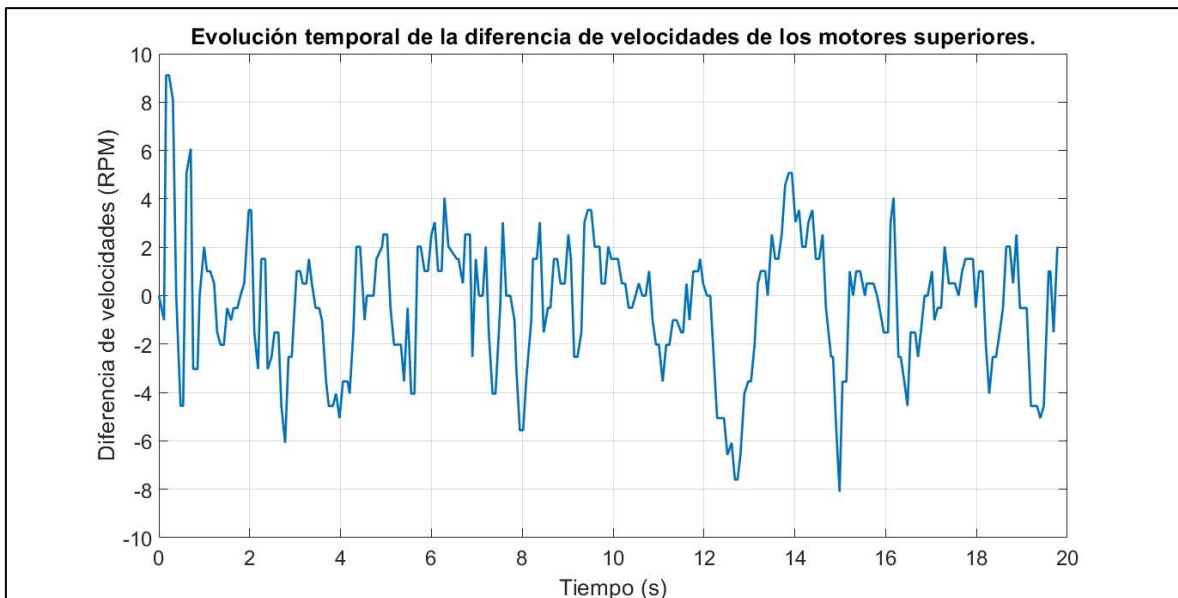


Gráfico 221. Evolución temporal de la diferencia de velocidades de los motores superiores.

- Características en el dominio del tiempo

Setpoint=90 RPM, N° zonas=7										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub(s)	Tp(s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1	0.997	0.114	0.609	1.504	4.022	1.774	1.971	0.525	2.437	-0.369
MOTOR 2	1.217	0.115	0.702	1.359	5.711	1.284	1.427	0.482	2.281	
MOTOR 3	1.434	0.115	0.609	1.88	5.156	0.952	1.058	0.542	2.215	0.151
MOTOR 4	1.284	0.115	0.61	1.357	5.156	1.109	1.232	0.49	2.131	
Promedio	1.233	0.115	0.633	1.525	5.011	1.280	1.422	0.510	2.266	

Tabla 34. Características en el dominio del tiempo de los motores con setpoint en 90RPM autosintonizados con 7 zonas.

e) Velocidad general de robot diferencial.

- Setpoint de 16.336 cm/s

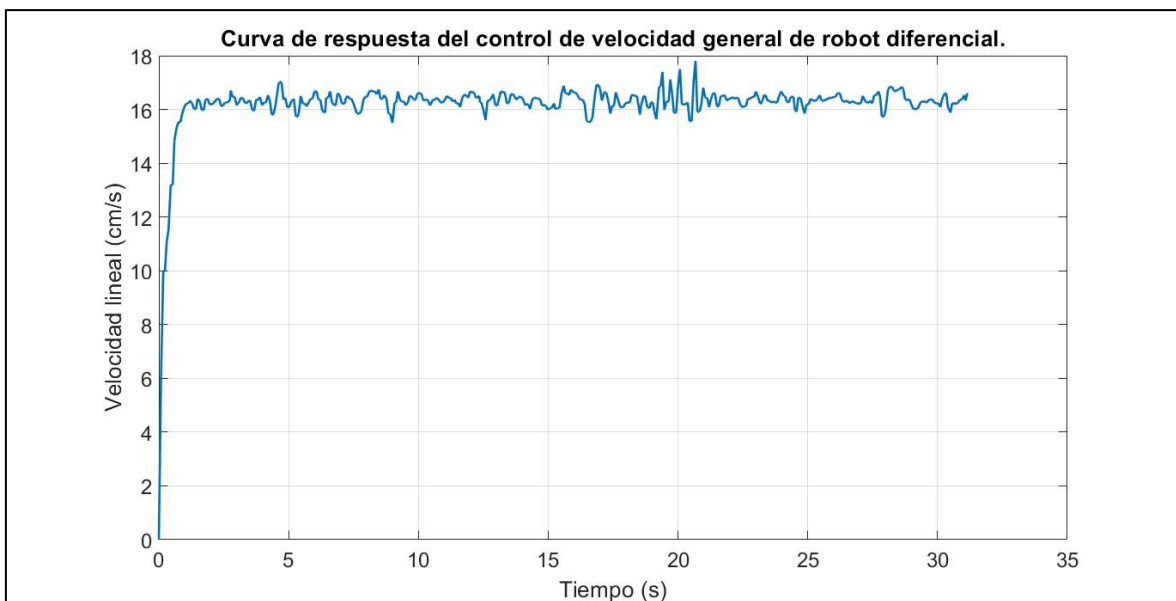


Gráfico 222. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 16.336 cm/s.



- Setpoint de 19.059 cm/s

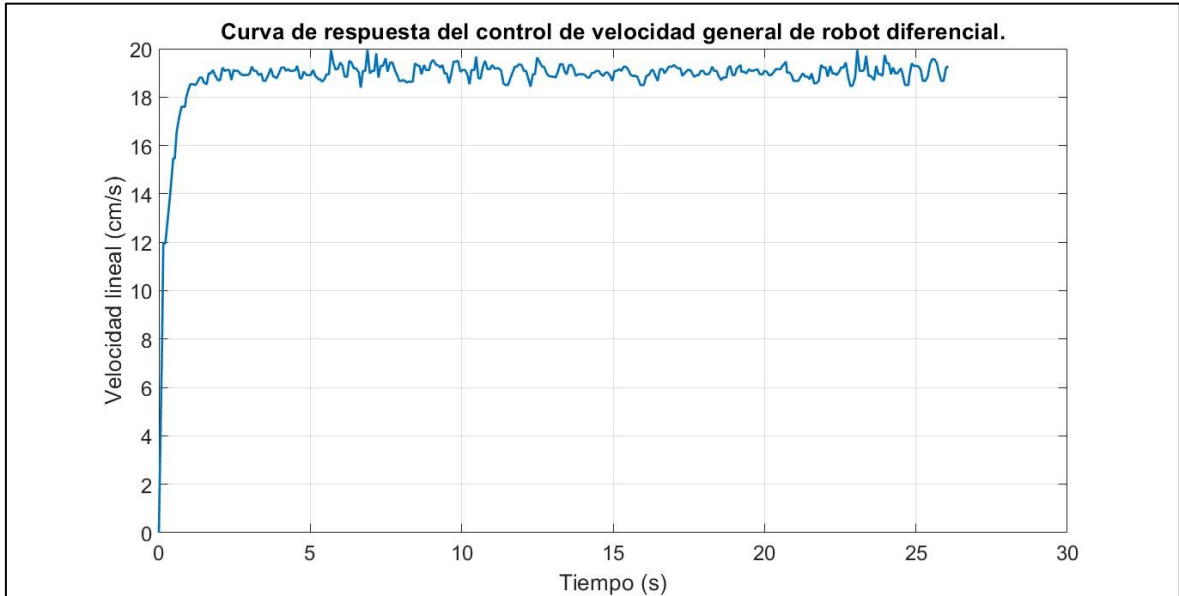


Gráfico 223. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 19.059 cm/s.

- Setpoint de 21.782 cm/s

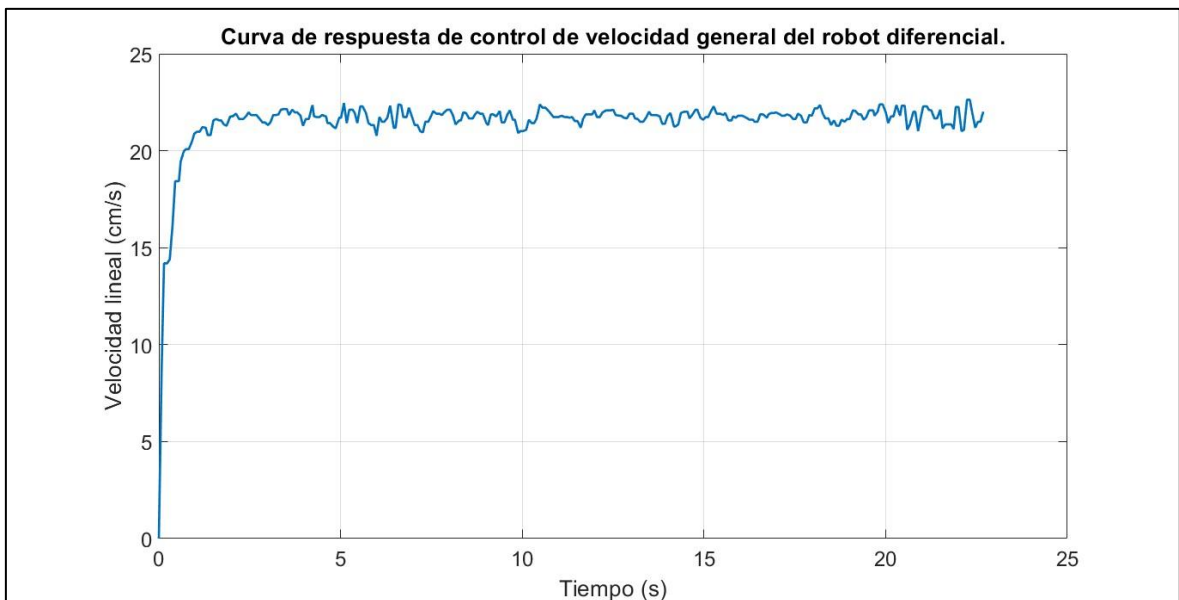


Gráfico 224. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 21.782 cm/s.

- Setpoint de 24.502 cm/s

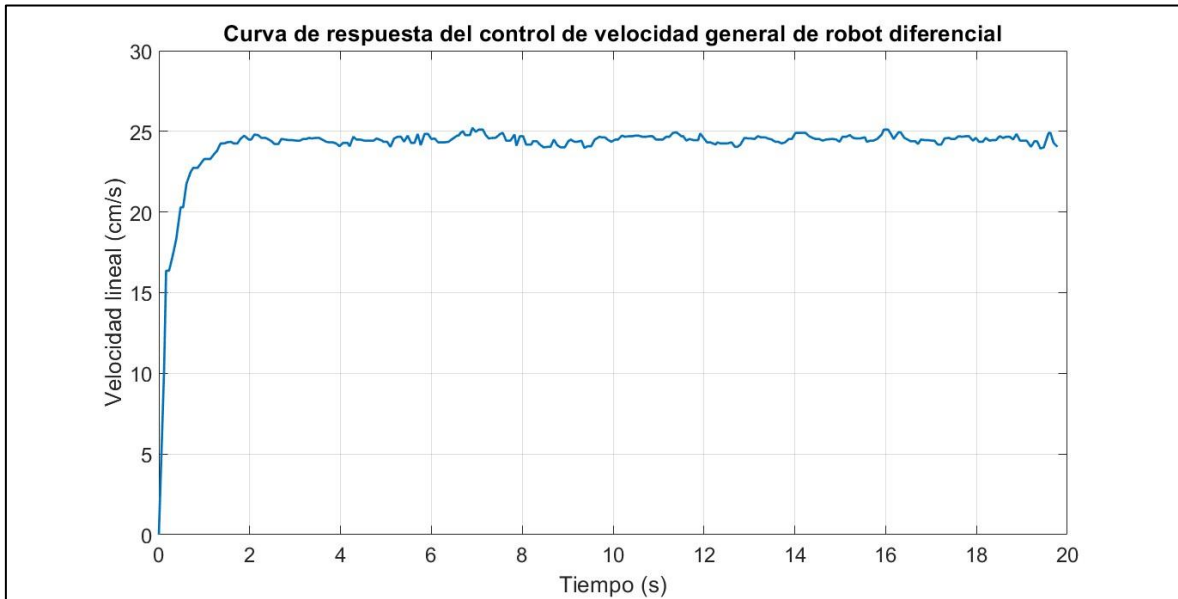


Gráfico 225. Curva de respuesta del control de velocidad general del robot diferencial con setpoint en 24.502 cm/s.

- Características en el dominio del tiempo

N° zonas=7									
Velocidad lineal (cm/s)	Velocidad por motor	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (cm/s)	% Ess prom	θ prom (rad/s)
16.336	60 RPM	0.761	0.086	0.599	1.494	9.019	0.209	1.278	0.0005
19.059	70 RPM	0.898	0.104	0.671	1.784	4.649	0.219	1.147	-0.001
21.782	80 RPM	0.923	0.078	0.599	1.571	3.9	0.271	1.245	-0.0032
24.504	90 RPM	0.997	0.115	0.609	1.588	2.902	0.206	0.839	-0.003

Tabla 35. Características en el dominio del tiempo de la velocidad general del robot diferencial autosintonizado con 7 zonas.

### 4.3. Análisis e interpretación de resultados

Las gráficas obtenidas de las curvas de control se muestran abruptas e irregulares, pero con bastante estabilidad y cercanía al setpoint. Esto da cuenta de las características de fricción del terreno agrícola al que se sometió el robot diferencial. Por otro lado, las gráficas de las diferencias de velocidad son oscilantes entre valores positivos y negativos debido a la compensación, predispuesta por la ganancia  $K_p$ , de la desviación. El valor promedio de esta diferencia de velocidades, brinda una cifra clave para el computo de la desviación totalitaria tendencial del robot diferencial.

Para cada sistema de difusificación-desdifusificación con un determinado número de zonas y a una determinada velocidad como setpoint, se obtuvo las características en el dominio del tiempo de la velocidad lineal de todo el robot diferencial junto con su velocidad de desviación promedio, de manera que, se brinda cumplimiento al objetivo general de la tesis.

El objetivo específico que consiste en la determinación del sistema de autosintonización difusa que posea menor tiempo de asentamiento promedio de los motores, a una determinada velocidad de prueba, consta de una búsqueda de cuál sistema es el más rápido en cuanto a su curva de respuesta, tomando la influencia de todos los motores. En los resultados numéricos, se puede determinar que el sistema difuso con menor tiempo de asentamiento promedio de los motores, es el sistema de autosintonización de 7 zonas de difusificación-desdifusificación a una velocidad por motor de 60 RPM, con un tiempo de asentamiento promedio de 0.816 s.

El objetivo específico que consiste en la determinación del sistema de autosintonización difuso que posea menor porcentaje de sobrepaso promedio de los motores, a una determinada velocidad. Tiene el significado de encontrar el sistema que se más estable ya que a mayor sobrepaso, mayor el riesgo de oscilación. En los resultados numéricos, se puede determinar que el sistema difuso con menor porcentaje de sobrepaso promedio es el sistema de autosintonización de 5 zonas de difusificación-

desdifusificación a una velocidad de 90 RPM por motor, con un porcentaje de sobrepaso promedio de 4.447%.

El objetivo específico que es definido por la determinación del sistema de autosintonización difusa que posea menor velocidad de desviación promedio de los dos pares de motores, se obtiene a partir de los recuadros de las características en el dominio del tiempo de la velocidad general lineal del robot diferencial. El resultado de esta búsqueda nos otorgara el sistema con menor desviación de trayectoria por diferencia velocidades a una determinada velocidad. A partir de la recolección de datos, el sistema difuso con menor velocidad de desviación promedio es el de 7 zonas a una velocidad lineal de todo el robot de 16.336 cm/s y una velocidad por motor de 60 RPM, la desviación promedio es de 0.0005 rad/s.

El objetivo específico que es definido como la determinación del sistema de autosintonización difusa con menor error estático promedio de sus motores a una determinada velocidad, consta de una búsqueda de cuál sistema logra ser más exacto en su cercanía al setpoint. El sistema difuso con menor error estático promedio es el de 3 zonas de difusificación-desdifusificación a 60 RPM por motor, con un error estático promedio de 1.165 RPM.

Las mediciones temporales como tiempo de subida, tiempo pico y tiempo de retardo, son indicadores de la rapidez del sistema y fungen de una opción alternativa de análisis, siempre y cuando, el tiempo de asentamiento posea un valor discutible debido a breves salidas de la banda de 5%.

Finalmente, un resultado interesante de analizar es que los tiempos de asentamientos de las velocidades lineales del robot diferencial autosintonizado con 7 zonas de difusificación-desdifusificación tienden a ser menores a los tiempos de asentamiento del sistema autosintonizado a 5 zonas. Además, los tiempos de asentamientos de las velocidades lineales del sistema autosintonizado a 5 zonas, también tienden a ser menores a los tiempos de asentamiento del sistema de 3 zonas. Consecuentemente, se puede afirmar que conforme aumenta los números de zonas, aumenta la velocidad de respuesta del sistema y disminuye el tiempo de asentamiento.

#### 4.4. Docimasia de la hipótesis

Los resultados obtenidos desacreditan por completo a la hipótesis propuesta en un inicio. Primeramente, cada motor tuvo características en el dominio del tiempo particulares, para cada número de zonas de difusificación-desdifusificación y a cada velocidad angular a la que se le sometió como setpoint. En segundo lugar, las características en el dominio del tiempo que la hipótesis menciona no coinciden exactamente con los obtenidos en la experimentación, de manera que, existe una presencia no nula de error estacionario promedio y velocidad de desviación promedio.

### V. **DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

El primer punto a discutir son las gráficas de las curvas de control que muestran ser irregulares cuando llegan al setpoint. Tal como se mencionó, esto se debe a las características del terreno agrícola. Sin embargo, habría la tendencia a desacreditar la efectividad del sistema de control para la planta. Por este motivo, dentro de los anexos se muestra el comportamiento de la interfaz gráfica de Node-Red para cuando el robot se encuentra en el terreno agrícola; y, cuando no experimenta fricción con el suelo. Tales gráficos sustentan el funcionamiento del sistema de control para las plantas de los motores, así como, su variación cuando se encuentra en un terreno irregular.

El segundo punto a discutir, es el tiempo de asentamiento que muestra dificultad para hallarlo certeramente, puesto que exige condiciones de permanencia en la banda de 5%. Tal como se explicó, se busca una seguidilla de 10 muestras posteriores dentro de la banda de 5%. Este criterio ha demostrado ser efectivo, sin embargo, posee sus excepciones en algunos casos. Una ligera de salida de la banda dentro de las 10 muestras, tendería a alargar el dato de tiempo de asentamiento. Tal situación se debe a las irregularidades repentinas o relieves que experimenta el robot en su trayecto. Un buen ejemplo de ello, es examinar el tiempo de asentamiento del motor izquierdo inferior a 60 RPM con autosintonización de 3 zonas de difusificación-desdifusificación. Su tiempo de asentamiento es mucho mayor a la de los otros motores.

Además, la compensación por  $K_p$  podría verse desacreditada. Para tales casos, es válido es considerar las otras características temporales que son el tiempo de subida, tiempo de retardo y tiempo pico, ya que muestran la evolución de la curva de control en la parte transitoria. Consecuentemente, no es posible desacreditar la compensación  $K_p$ , tan solo considerando el tiempo de asentamiento, es menester examinar las otras características temporales.

El tercer punto a discutir es la velocidad de desviación promedio. Esta parece ser cercana a cero al igual que las diferencias de velocidades. Sin embargo, este resultado podría ser engañoso. Ténganse en cuenta que estamos considerando un valor promedio, y que las diferencias de velocidades van desde valor positivos a negativos lo cual influyen que, en suma totalitaria, el valor se reduzca considerablemente. Pero en la práctica, si se considera desviaciones instantáneas, estas podrían influir severamente en la percepción de la trayectoria del robot en un determinado instante de tiempo hasta que se compense. En tales casos, se debe tener la confianza de que el sistema de compensación por  $K_p$  del robot diferencial actuara y sus resultados podrían solo verse examinando toda la trayectoria en general del robot.

Por último, evaluando el porcentaje de error estacionario promedio para cada motor, se puede notar que ninguno supera el 5%, de forma que, se puede afirmar que los sistemas de control autosintonizados, cumplen con su propósito principal de reducción del error.

## CONCLUSIONES

A partir del trabajo de investigación realizado, se puede obtener las siguientes conclusiones:

- La autosintonización ha demostrado cumplir con su propósito máximo de lograr estabilidad y adaptabilidad en el sistema, puesto que en ningún ensayo se ha denotado inestabilidades críticas en la curva de control. Sin embargo, si se han suscitado sobrepasos exigentes.
- Todos los sistemas de autosintonización difusa han logrado efectividad al momento de reducir el error estacionario a valores menores al 5%, de manera que cumplen con el principal propósito de todo sistema de control automático.
- La gran cantidad de características en el dominio del tiempo obtenidas, no permite definir qué sistema de autosintonización es más óptimo, pero si evaluar cual presenta el mejor valor para un parámetro determinado a una determinada velocidad. De forma que, el lector puede escoger si desea priorizar estabilidad, exactitud, reducción de desviación o rapidez de respuesta; con el fin de escoger el sistema que más le convenga.
- Conforme aumenta el número de zonas de autosintonización, existe la tendencia de que el sistema posea menores tiempos de asentamientos; y, por lo tanto, ser más rápido.
- La compensación por  $K_p$  para la velocidad de desviación promedio ha resultado ser efectiva con desviaciones resultantes cercanas a cero. Este sistema de reglas puede ser aplicable, siempre y cuando se desee reducir la desviación en la trayectoria total del robot.

## RECOMENDACIONES

- Es importante hallar parámetros de tiempo de muestreo o interrupción de manera experimental y que concatene con la interfaz de Node- Red. Debido a que la transmisión de datos es demasiada extensa, esto limita gravemente la integridad de recepción, consecuentemente el tiempo de interrupción debe ser lo suficientemente extenso para que asegure una buena recepción.
- Se debe prestar especial atención a la revisión mecánica del robot, con un aseguramiento correcto de los pernos y trenes de rodaje.
- El uso de funciones es esencial en la programación del microcontrolador STM32, permite el ahorro de procesamiento y memoria. Esto resulta de gran importancia si consideramos que son 4 motores con dos autosintonizaciones por cada uno.
- El uso de Excel es vital, puesto que ayuda a la corrección de datos de tiempo defectuosos que se reciben.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boru, D., & Wang, Z. (2017). Design and control for differential drive mobile robot. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(10), pp 327-334. Obtenido de: <https://www.ijert.org/design-and-control-for-differential-drive-mobile-robot>.
- Contreras, J., Berrocal, J., Paucar, C. & López, C. (2016). Control de velocidad de motor DC utilizando Lógica Difusa. *Revista de la Universidad Tecnológica del Perú*, 1-6. Obtenido de: [https://www.academia.edu/30335003/Control\\_de\\_velocidad\\_de\\_motor\\_DC\\_utilizando\\_L%C3%B3gica\\_Difusa](https://www.academia.edu/30335003/Control_de_velocidad_de_motor_DC_utilizando_L%C3%B3gica_Difusa).
- González, R., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2015). Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control. *Revista Iberoamericana de Automática e Información Industrial RIAI*, 12(1), 3-12. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791214000788>
- Hidalgo, L. (25 de marzo de 2018). Adex: Regiones costeras concentran el 86% de agroexportaciones. Obtenido de Gestión: <https://gestion.pe/economia/adex-regiones-costeras-concentran-86-agroexportaciones-230160-noticia/>.
- Rubio, F., Valero, F. & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of advanced robotic systems*, 16(2), 1-22. doi:10.1177/1729881419839596
- Wit, C., Khenouf, H., Samson, C., & Sordalen, O. (1993). Nonlinear control design for mobile robots. *Recent Trends Mobile Robots*, 11, 121-156. doi:10.1142/9789814354301\_0005.
- Almeida, M. & Coelho, A. (2002). A fuzzy logic method for autotuning: SISO and MIMO systems. 15th Triennial World Congress. Obtenido de: <https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/ifac2002/data/content/03031/abstract.htm>
- Valencia, V., Jhonny, A., Montoya, O. Rios, A. & Hernando, L. (2009). Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a

partir de la estimación odométrica. *Scientia Et Technica*, XV(41), 191-196. Obtenido de:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84916680034>.

- Bakhtiar, I. & Mehrdadi, B. (2012) *Design of an iterative auto-tuning algorithm for a fuzzy PID controller*. *Journal of Physics: Conference Series*, 364, 1-3. doi: 10.1088/1742-6596/364/1/012052.
- Nurmaini, S. & Chusniah. (2017). *Differential Drive Robot Control using Variable Fuzzy Universe of Discourse*. 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science. doi: 10.1109/ICECOS.2017.8167165.
- Sotelo, A. & Contreras, J. (2020). *Implementación de un robot explorador con realidad virtual para incrementar la seguridad de la institución educativa 7213 peruano japones en el distrito de Villa El Salvador-2020*. Universidad Privada del Norte.
- Chávez, D. & Chávez, E. (2021). *Diseño e implementación de un controlador difuso en controladores lógicos programables utilizando el método del centroide*. Universidad Privada Antenor Orrego.
- García, J. (2022). *Controlador de tracción en lógica difusa para un robot móvil*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Fraile M., J., García, P. & Fraile A. J. (2018). *Ingeniería de control: Aplicaciones con MATLAB*. Garzeta.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial*. Alfaomega.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna (5ta edición)*. Pearson.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto (2da edición)*. Prentice Hall.
- Landau, I. , Lozano, R. , M 'Saad, M. & Alierieza, K. (2011). *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications (2da edición)*. Springer.
- Rodríguez, F., & López, M. (1996). *Control adaptativo y robusto*. Universidad de Sevilla.
- Martin del Brío, B. & Sanz, A. (2006). *Redes neuronales y Sistemas Difusos (2da edición)*. Alfaomega.
- Corke, Peter. (2017). *Robotics, Vision and Control: Fundamental algorithms in MATLAB (2da edición)*. Springer.

## ANEXOS

a) Tablas de recolección de datos.

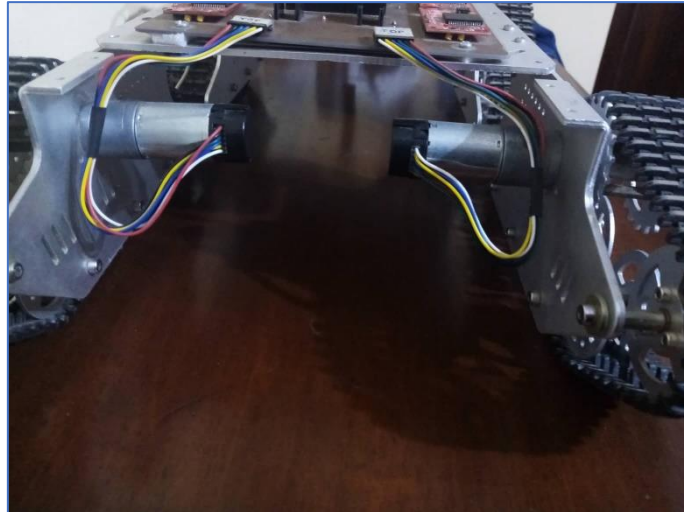
Setpoint= , N° zonas=										
	Ts (s)	Tr (s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (RPM)	% Ess prom	Kp prom	Ki prom	Δw prom (RPM)
MOTOR 1										
MOTOR 2										
MOTOR 3										
MOTOR 4										
Promedio										

Tabla 36. Almacenamiento de características en el dominio del tiempo, por respuesta de cada motor y sistemas de N zonas difusas.

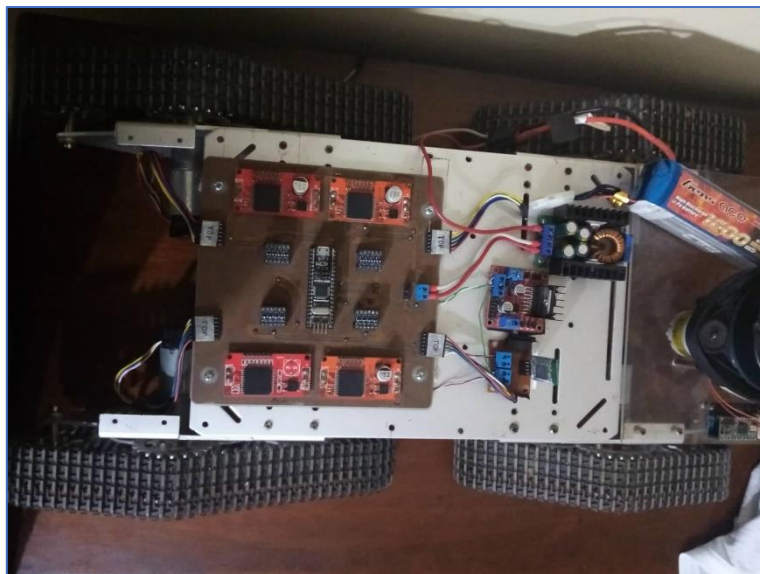
N° zonas=									
Velocidad lineal (cm/s)	Velocidad por motor	Ts (s)	Tr(s)	Tsub (s)	Tp (s)	Mp (%)	Ess prom (cm/s)	% Ess prom	θ prom (rad/s)
16.336	60 RPM								
19.059	70 RPM								
21.782	80 RPM								
24.504	90 RPM								

Tabla 37. Almacenamiento de datos de la velocidad total del robot diferencial por sistema de zonas difusas.

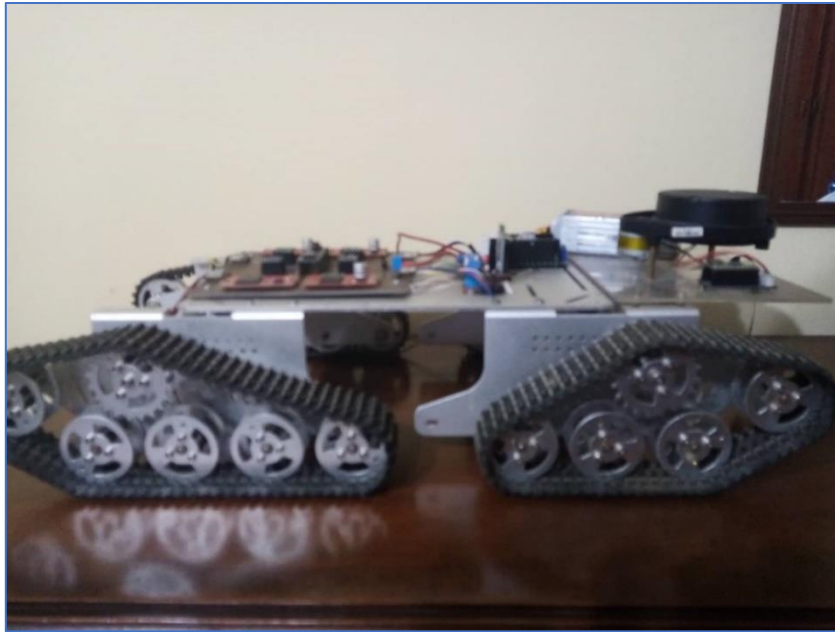
b) Imágenes del robot móvil diferencial.



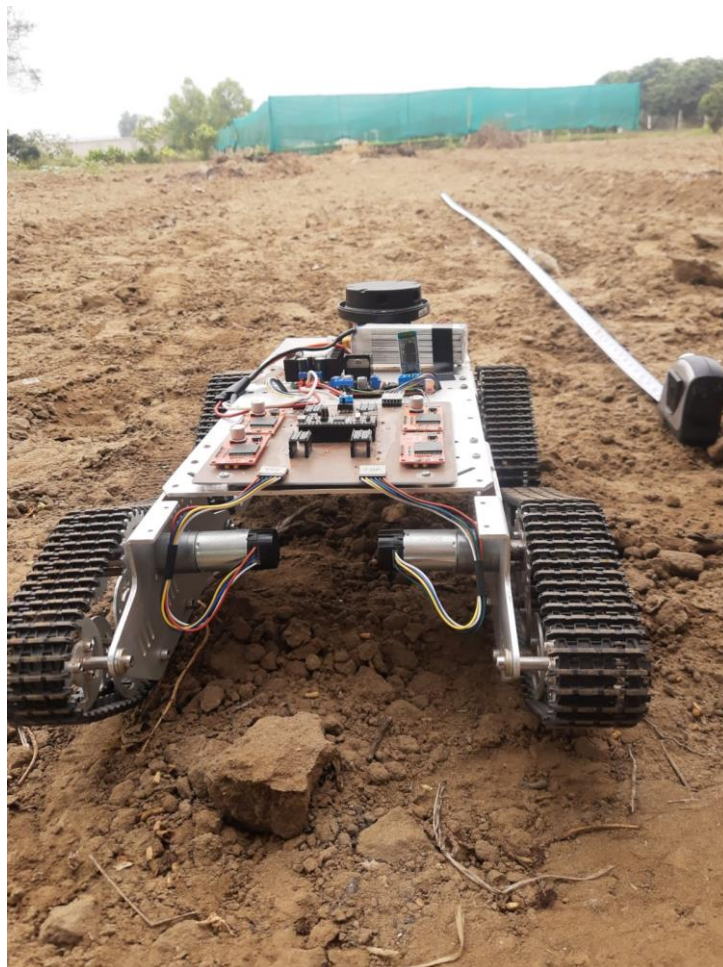
*Gráfico 226. Motores DC del robot.*



*Gráfico 227. Placa del robot.*



*Gráfico 228. Trenes de rodaje del robot.*



*Gráfico 229. Robot diferencial en terreno agrícola.*



```

47
48 void Zonas3(float error, float errorv, float diferror){
82
83 void Zonas5(float error, float errorv, float diferror){
37
38 void Zonas7(float error, float errorv, float diferror){
65 /* USER CODE END 0 */
66
67 /**
68  * @brief The application entry point.
69  * @retval int
70  */
71 int main(void)
72 {
73     /* USER CODE BEGIN 1 */
74
75     /* USER CODE END 1 */
76
77     /* MCU Configuration-----*/
78
79     /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
80     HAL_Init();
81
82     /* USER CODE BEGIN Init */
83
84     /* USER CODE END Init */
85
86     /* Configure the system clock */
87     SystemClock_Config();

```

Gráfico 232. Predisposición de funciones.

```

//CONTROL PARA MOTOR RPM3 DERECHO SUPERIOR
errorids= SETPOINT-RPM3;
//PARTE PROPORCIONAL
errorisv=errorisv;
//PARTE INTEGRAL-revisar errorides
diferrorids=errorids-errorids1;
//////////CAMBIAR
//Zonas3(errorids,errorisv,diferrorids);
//Zonas5(errorids,errorisv,diferrorids);
Zonas7(errorids,errorisv,diferrorids);
errorids=errorids*kp;
Pids= Pids1+errorids;
f=kp-(ki)*ts;
errorids1=errorids1*(f);
Pids=Pids-errorids1;
errorids1=errorids/kp;
Pids1=Pids;
if (Pids>100){

    Pids=100;
}

if (Pids<0){ Pids=0;}
Pids=Pids*(2047);
Pids=Pids/100;
duty3=round(Pids);

kp3=kp;
ki3=ki;

dif1= RPM1-RPM4; //son los traseros
dif2=RPM2-RPM3;//son los delanteros

__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim3, TIM_CHANNEL_1,duty4);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim3, TIM_CHANNEL_2,duty3);//original duty3
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim4, TIM_CHANNEL_2,duty2);//original duty2
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim4, TIM_CHANNEL_1,duty);
printf("%.2f %.2f %.2f %.2f %.2f %.2f %.2f %.2f %.2f %.2f %.2f\n", RPM1,kp1,ki1,RPM2,kp2,ki2,RPM3,kp3,ki3,RPM4,kp4,ki4);

```

Gráfico 233. Programación del motor derecho superior.

e) Interfaz Node-Red

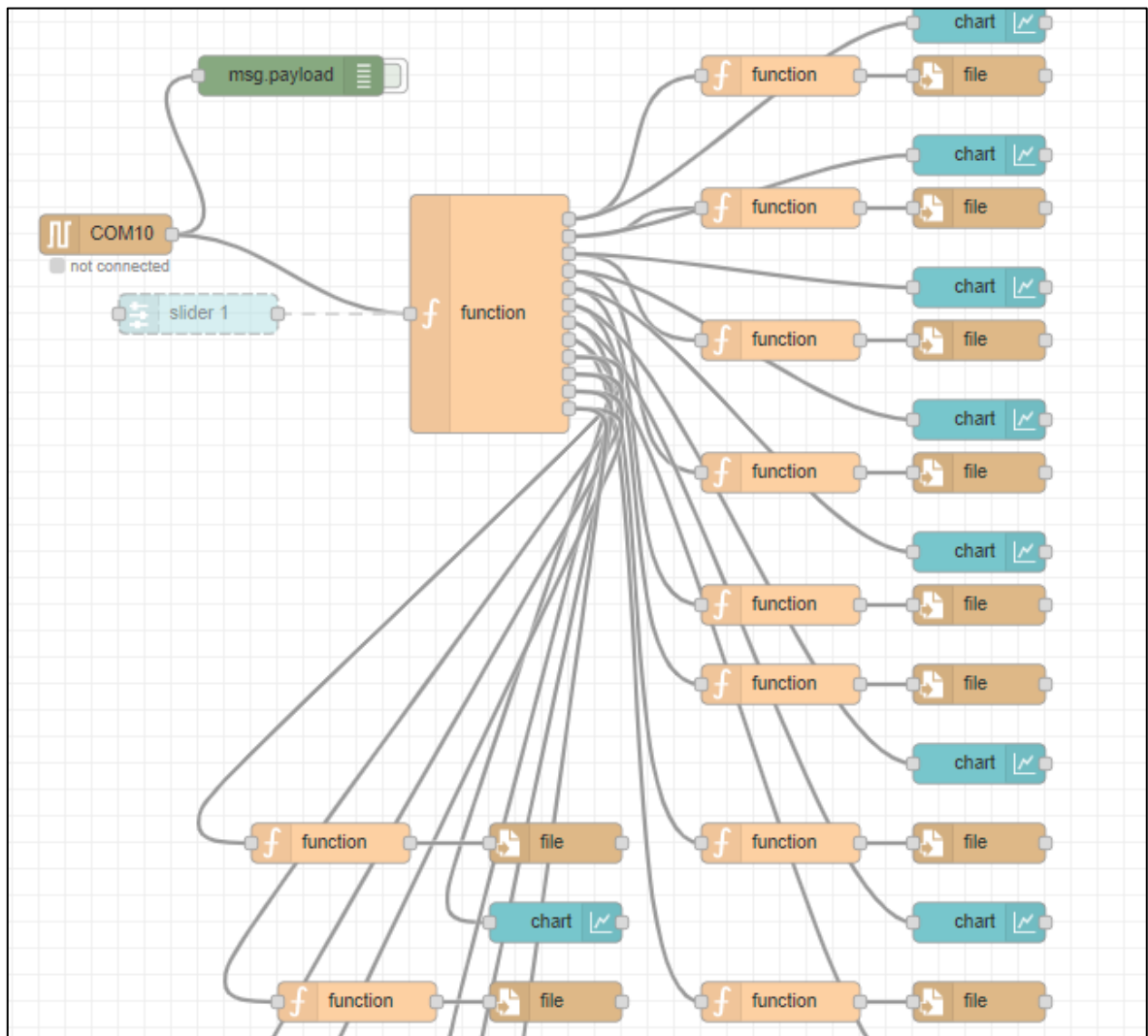


Gráfico 234. Programación por bloques de la interfaz.



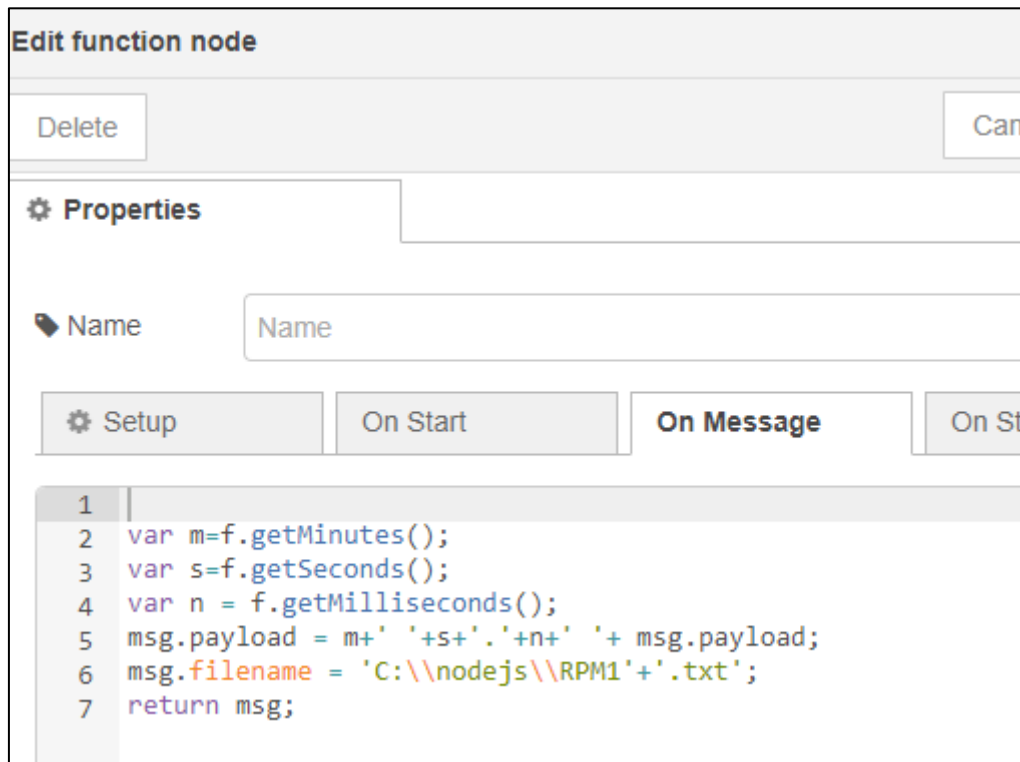


Gráfico 235. Programación de recepción.

Autosintonización difusa			
RPM1	kp1	ki1	RPM2
kp2	ki2	RPM3	kp3
ki3	RPM4	kp4	ki4

Gráfico 236. Dashboard de Node-Red.

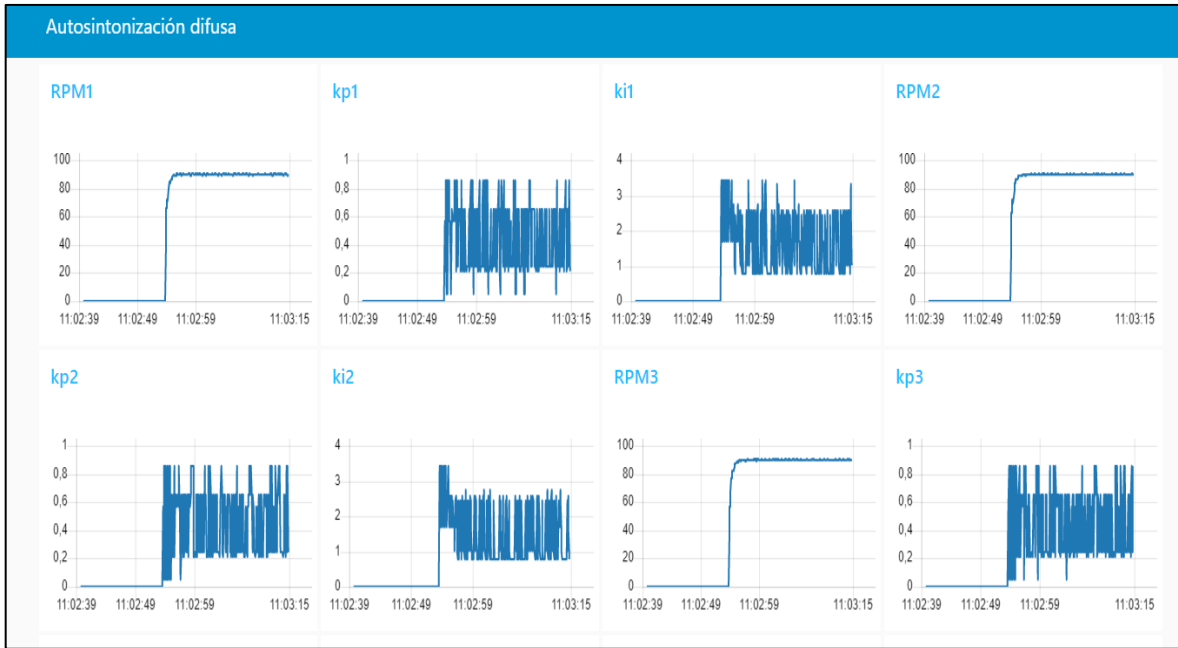


Gráfico 237. Interfaz Node-Red con el robot diferencial sin contacto con el suelo



Gráfico 238. Interfaz Node-Red con el robot diferencial sin contacto con el suelo.

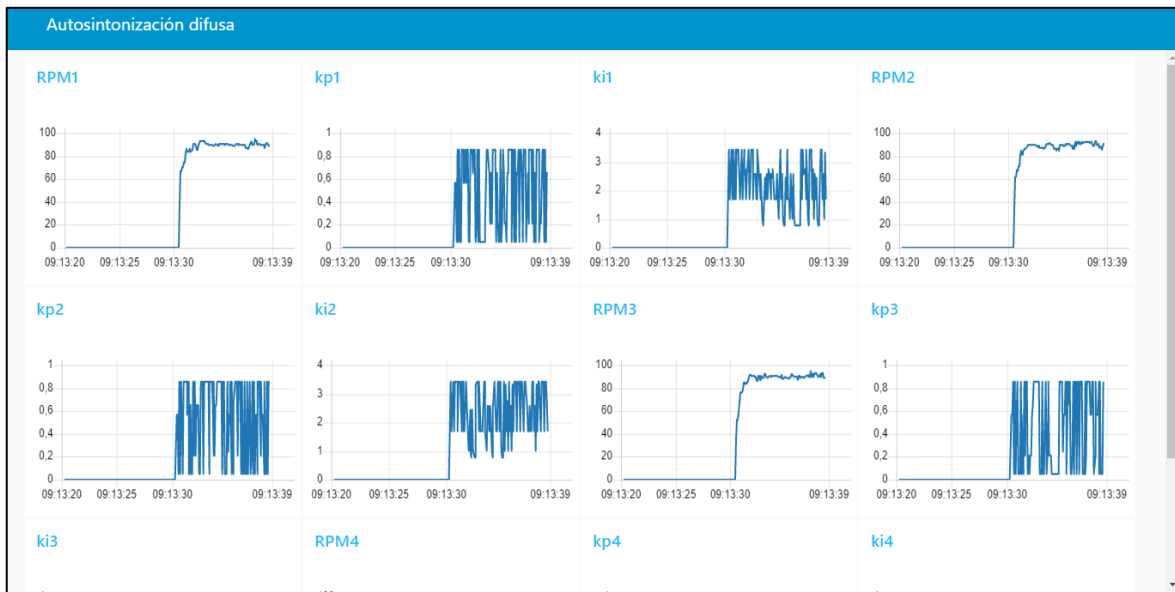


Gráfico 239. Interfaz Node-Red con el robot diferencial en terreno agrícola.

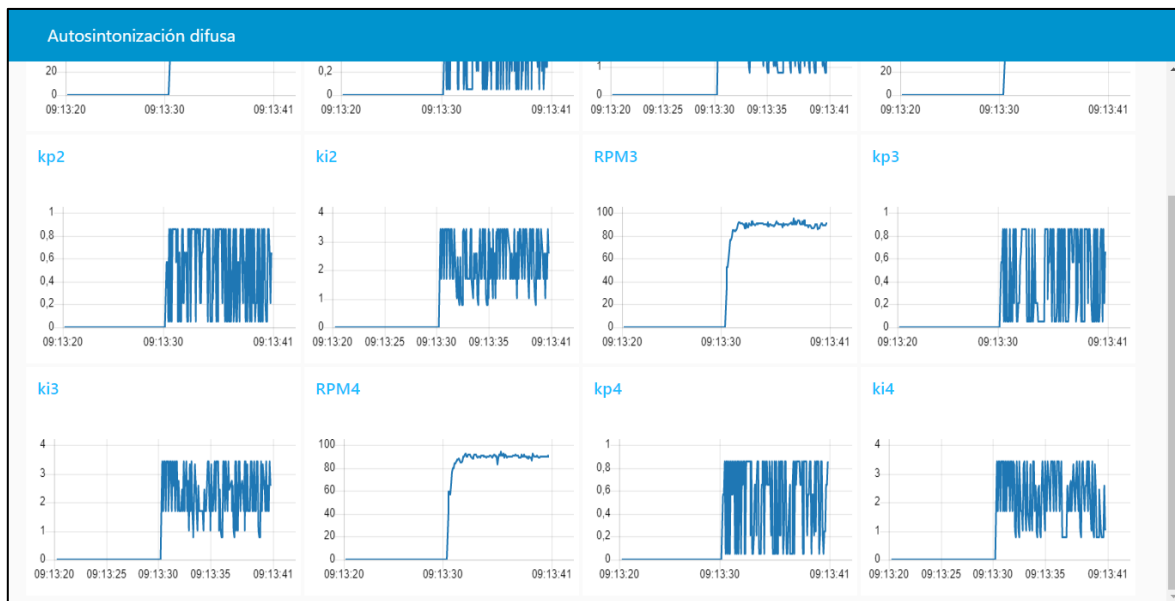


Gráfico 240. Interfaz Node-Red con el robot diferencial en el terreno agrícola.

## f) Programa en Matlab

```
dtiempo.m x +
%PRIMERO FILTRA LOS DATOS DEFECTUOSOS Y ARREGLOS
%SE TIENE QUE INGRESAR EL TIEMPO DE ASENTAMIENTO Y EL SETPOINT
prompt = "Poner setpoint: ";
s=input(prompt); %ingresamos el setpoint de la curva de control
l0=s-s*0.05;
l1=s+s*0.05;
LBanda=[l0 l1]
prompt="Poner tiempo de asentamiento: ";
ts=input(prompt);
f=find(T==ts); %encontramos la posición del tiempo de asentamiento
h=R(1:f);
y=T(1:f);

%graficamos R vs t, con todos los rótulos
%Nos va votar los limites de banda del 5%
%Obtenemos tp,ts,tr, err prom
%PORCENTAJE DE SOBREPASO
Mp=max(R); % los vectores van a ser T y R, en cuanto al tiempo y respuesta de control, respectivamente.
Mp=(Mp-s)/s;
Mp=Mp*100;

%TIEMPO PICO
v1=find(T==ts);
vt=T(1:v1+10);
vr=R(1:v1+10);
u=max(vr);
```

Gráfico 241. Programa en Matlab.

```
j=min(y);
y=find(y==j);
tr=vt(y);

%TIEMPO DE SUBIDA
f1=0.10*s;
f2=0.90*s;
k=abs(vr-f1);
j=min(k);
k=find(k==j);
f1=vt(k);
k=vr-f2;

ht=1;
while k(ht)<0
    ht=ht+1;
end

k=k(1:ht);
k=abs(k);
j=min(k);
k=find(k==j);
f2=vt(k);
```

Gráfico 242. Programa en Matlab.

```

%ERROR ESTACIONARIO PROMEDIO Y SU PORCENTAJE
ve=length(R);
ve=R(v1:ve);
pr=ve-s;
pr=abs(pr);
pr=mean(pr);

prp= 100*pr/s;

% EDICIÓN DE GRÁFICAS
vc=20;
plot(T,R,'LineWidth',2)
grid
title('Curva de respuesta del control de velocidad general de robot diferencial','FontSize',vc)
xlabel('Tiempo (s)','FontSize',vc)
ylabel('Velocidad lineal (cm/s)','FontSize',vc)
set(gca,'FontSize',18)

```

*Gráfico 243. Programa en Matlab.*