

Diseño y simulación de un controlador ABS basado en un PID con Anti-Windup para la estabilidad del vehículo

Alexis Lechuga de los Santos

Andre Alberto Contreras Rivera

20 de Octubre del 2021

1.1 Diagrama de Bloques

Se diseñó un sistema de frenos antibloqueo, el cual se describe detalladamente en el diagrama de bloques mostrado en la figura 1.

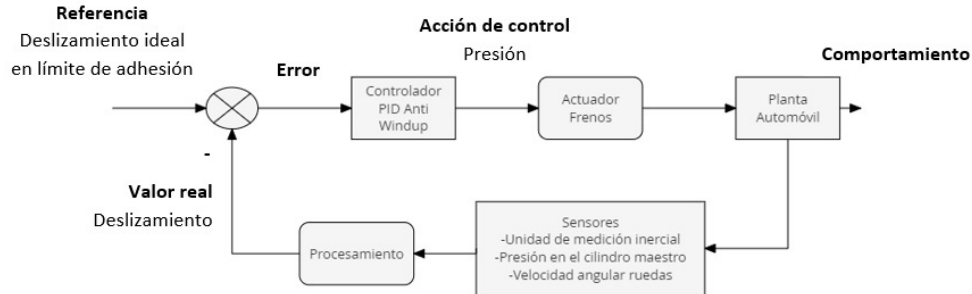


Figure 1: Diagrama de bloques del sistema

2 Decisiones de Diseño

2.1 Funcionamiento general del sistema

La primera decisión tomada sobre el diseño del sistema fue la variable a controlar, optando por controlar el deslizamiento de cada una de las ruedas para aumentar la tracción del vehículo sobre el camino y sobre todo evitar que las ruedas se bloquearan o patinaran y así mejorar los parámetros de frenado del vehículo.

Así mismo, seleccionamos como variable a manipular la presión que se ejerce sobre cada una de las pinzas de los frenos y decidimos monitorear los valores de los sensores para cada una de las ruedas por separado y generar también una acción de control particular para las presiones de cada una de las pinzas de los frenos.

2.2 Valor de referencia del Deslizamiento

Para disminuir el tiempo y la distancia de frenado se desea que la adhesión de las ruedas al camino sea la máxima posible, y dado que el valor

de deslizamiento donde se tiene esta máxima adhesión es el que se encuentra en el límite de la transición entre la adhesión y el deslizamiento completo de la rueda (evitando que se bloquee), ubicamos nuestra referencia de deslizamiento justo antes de dicho límite.

Para la selección del valor específico, probamos el rendimiento del sistema con diferentes valores para el deslizamiento desde 0.15 hasta 0.25, con un intervalo de 0.05, obteniendo que para nuestro caso el mejor rendimiento se dio con un deslizamiento de 0.2, valor que coincide aproximadamente con la ubicación del s_{max} en la gráfica de deslizamiento con respecto a la fuerza mostrada en la figura 2.

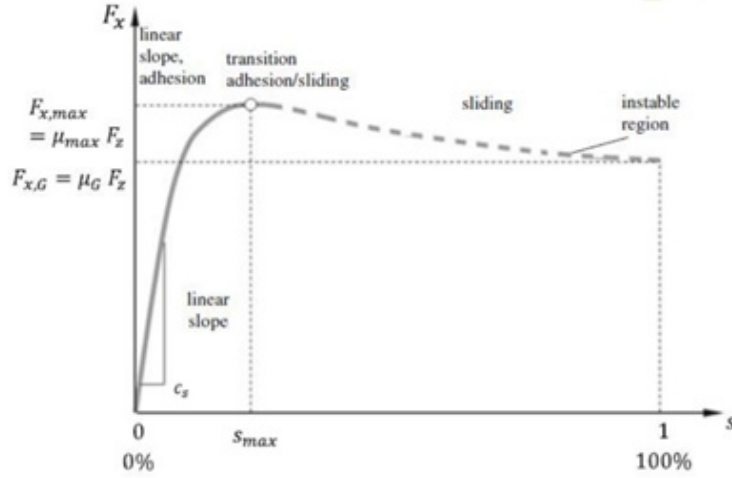


Figure 2: Gráfica del deslizamiento con respecto a la fuerza

2.3 Monitoreo del Deslizamiento

Para obtener el deslizamiento decidimos utilizar la fórmula para una rueda siendo frenada, donde la diferencia entre la velocidad longitudinal y la tangencial proveniente de la velocidad angular de la rueda multiplicada por su radio, se divide entre la velocidad longitudinal.

$$s_B = \frac{v_P}{v} = \frac{v - \omega r}{v}$$

La obtención de la velocidad longitudinal fue a partir de la aproximación a la integral de la aceleración longitudinal provista por la Unidad de medición inercial, aproximación que fue realizada mediante la suma de Riemann, donde se hace la sumatoria de los rectángulos formados en el área bajo la curva, tomando como base de cada rectángulo el valor del tiempo de muestreo ∂T y como altura el valor de la aceleración longitudinal en esa iteración.

Para obtener el radio originalmente y como sucedería si no se tuviera el modelo del vehículo o no se conocieran las dimensiones de las ruedas, consideramos que en momentos antes del frenado se cumplen condiciones ideales donde se puede asumir que la velocidad longitudinal es igual a la tangencial de la rueda, por lo que se podría aproximar el valor del radio al despejarlo de la siguiente fórmula.

$$V = \omega \cdot R \quad \rightarrow \quad R = \frac{V}{\omega}$$

Añadiendo que de preferencia se tendría que tomar el valor de la velocidad angular de las ruedas en los ejes donde se tenga la tracción del vehículo, ya que se asemejarían más al comportamiento de las ruedas en rodamiento puro.

Pero posteriormente al indagar en los bloques del modelo del vehículo nos encontramos con que el radio se podía obtener a partir de una constante K, en un segmento en el cual se llevaba a cabo esta misma relación en donde la velocidad longitudinal es igual a la tangencial de la rueda.

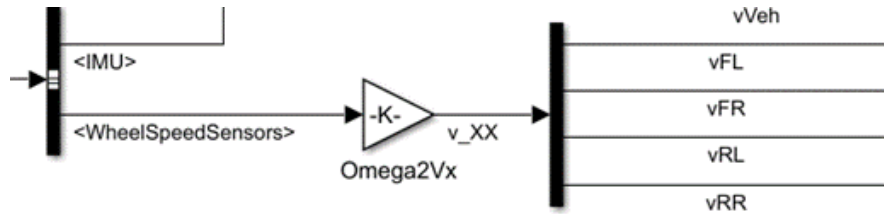


Figure 3: Diagrama de los sensores de las ruedas en Simulink

2.4 Mecanismo de Control

Para nuestro sistema decidimos utilizar como mecanismo de control un controlador PID con efecto anti windup cuya forma se basa en la del tradicional PID pero agregando un lazo cerrado para evitar la sobrecarga de la acción integradora, por lo que se consideran los errores y acciones de control de iteraciones anteriores. El diagrama de bloques se muestra en la figura 4.

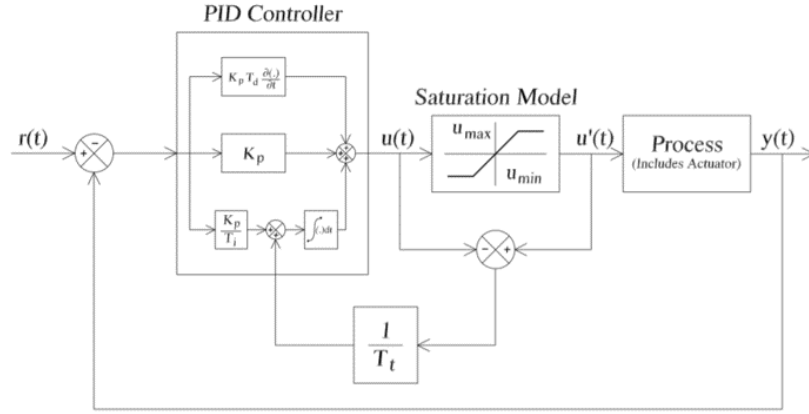


Figure 4: Diagrama de bloques del controlador PID anti windup

Nuestro controlador se encuentra alimentado por el error, que se obtiene a partir de la diferencia entre el valor de referencia del deslizamiento y el valor real del deslizamiento calculado para cada rueda ya que el algoritmo de control que usamos tiene la siguiente forma:

$$u[k] = u[k-1] + K_p \left\{ e[k] - e[k-1] + \frac{T}{T_i} e[k] + \frac{T_d}{T} (e[k] - 2e[k-1] + e[k-2]) \right\} + \frac{T}{T_t} v[k]$$

Para obtener la acción de control de cada iteración se necesitan considerar los errores y acciones de control de iteraciones anteriores, relacionándose con las constantes K_p , T_i y T_d .

Además, la decisión de usar este controlador incluyendo el efecto anti-windup proviene del objetivo de evitar saturar los actuadores ante valores

exigidos por la acción de control que exceden valores preestablecidos o bien capacidades físicas, por lo que en nuestro programa se programaron condiciones para limitar la acción de control haciendo para que la máxima fuera una relación a uno con la presión sobre el cilindro maestro.

- Acción proporcional: $u(t) = K_p \cdot e(t)$
- Acción integral (Reseteo): $u(t) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^\infty e(t) dt$
- Acción derivativa (Predicción): $u(t) = \tau_d \frac{de(t)}{dt}$

Finalmente, para la selección de las constantes K_p , T_i y T_d que ejercen las acciones proporcional, integral y derivativa respectivamente se realizó un barrido comprobando el rendimiento del sistema ante las diferentes pruebas, seleccionando los valores de los intentos con los mejores resultados tomando en consideración también, como se explicará más adelante, el cumplimiento de todos los requerimientos con dichos valores.

3 Tablas de Progreso

Para verificar el funcionamiento de nuestro controlador, se realizaron tres pruebas de validación diferentes; en cada una se espera que el vehículo no salga del carril, es decir, que tenga un viraje constante. Para cada prueba se realizaron cinco intentos con diferentes valores resaltando los mejores tres para ser graficados en la siguiente sección.

3.1 Init_Panic90.m

En esta prueba de validación se realiza un freno de pánico (se aplica el pedal de freno a fondo) a una velocidad aproximada de 90 km/h, en una superficie homogénea [$\mu = 0.9$]. El progreso se muestra en la tabla 1.

Progreso – Caso 1					
Velocidad Inicial: 88-92 km/h Entrada de freno: 1	T1	T2	T3	T4	T5
Controlador	No	Sí - PID	Sí - PID	Sí - PID	Sí - PID
Tiempo de frenado (seg)	7.145	4.87	4.255	4.14	4.04
Distancia de frenado (m)	99.69	68.74	56.95	52.74	48
Slip target	-	0.2	0.2	0.2	0.2
Kp	-	1.8	1	0.9	0.8
Ki	-	1.5	0.5	0.3	0.08
Kd	-	0	0	0	0

Table 1: Progreso de la prueba *Init_Panic90.m*

3.2 Init_LightAndPanic70.m

En esta prueba de validación se realiza un freno ligero y pánico repentino (se aplica el pedal de freno ligeramente y sin soltar el pedal, se aplica a fondo) a una velocidad aproximada de 70 km/h, en una superficie cuasi-homogénea [$\mu = 0.93; 0.88; 0.81; 0.86$ (FL; FR; RL; RR)]. El progreso se muestra en la tabla 2.

Progreso – Caso 2					
Velocidad Inicial: 68-72 km/h Entrada de freno: 1	T1	T2	T3	T4	T5
Controlador	No	Sí - PID	Sí - PID	Sí - PID	Sí - PID
Tiempo de frenado (seg)	6.075	4.905	4.94	4.55	4.39
Distancia de frenado (m)	72.66	61.98	62.08	60.16	48.39
Slip target	-	0.2	0.2	0.2	0.2
Kp	-	1.8	1	0.9	0.8
Ki	-	1.5	0.5	0.3	0.08
Kd	-	0	0	0	0

Table 2: Progreso de la prueba *Init_LightAndPanic70.m*

3.3 Init_HighLow70.m

En esta prueba de validación se realiza un freno de pánico (se aplica el pedal de freno a fondo) a una velocidad aproximada de 70 km/h, en una superficie homogénea [$\mu = 0.9$]. Sin embargo, hay un cambio en el coeficiente μ de alto a bajo. El progreso se muestra en la tabla 3.

Progreso – Caso 3					
Velocidad Inicial: 68-72 km/h Entrada de freno: 1	T1	T2	T3	T4	T5
Controlador	No	Sí - PID	Sí - PID	Sí - PID	Sí - PID
Tiempo de frenado (seg)	5.925	4.315	3.85	3.93	3.96
Distancia de frenado (m)	70.47	47.86	42.5	42.36	42.27
Slip target	-	0.2	0.2	0.2	0.2
Kp	-	1.8	1	0.9	0.8
Ki	-	1.5	0.5	0.3	0.08
Kd	-	0	0	0	0

Table 3: Progreso de la prueba *Init_HighLow70.m*

4 Gráficas de resultados

A continuación se presentarán las gráficas del *Scope* y del *Slip* de los tres mejores intentos de cada prueba; dichos intentos se muestran en orden ascendente de mejoría.

- **Init_Panic90.m:** De la figura 5 a la figura 10.
- **Init_LightAndPanic70.m:** De la figura 11 a la figura 14.
- **Init_HighLow70.m:** De la figura 19 a la figura 22.

4.1 Init_Panic90.m

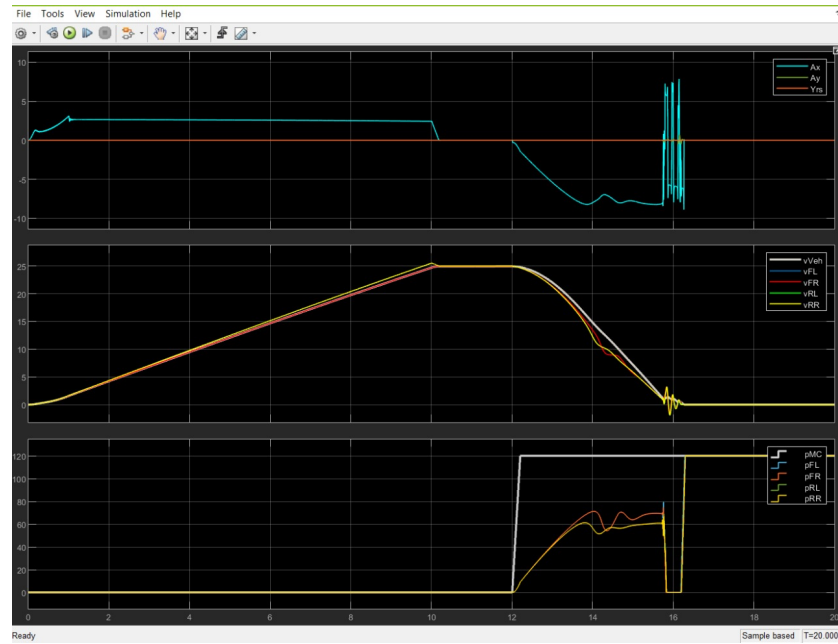


Figure 5: Gráfica del *Scope* en Simulink del T3



Figure 6: Gráfica del *Slip* en Simulink del T3

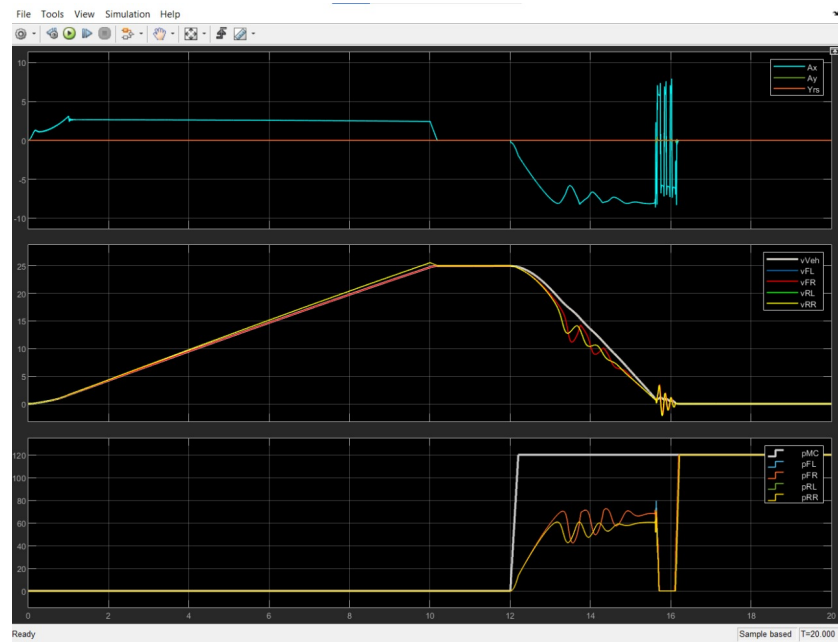


Figure 7: Gráfica del *Scope* en Simulink del T4

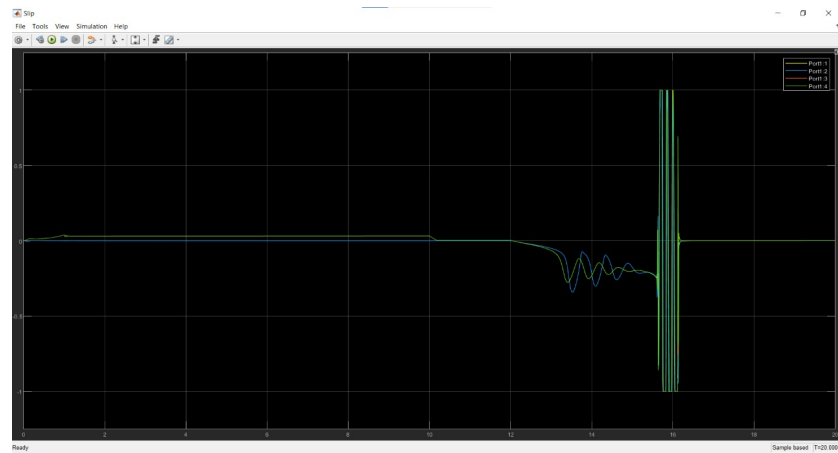


Figure 8: Gráfica del *Slip* en Simulink del T4

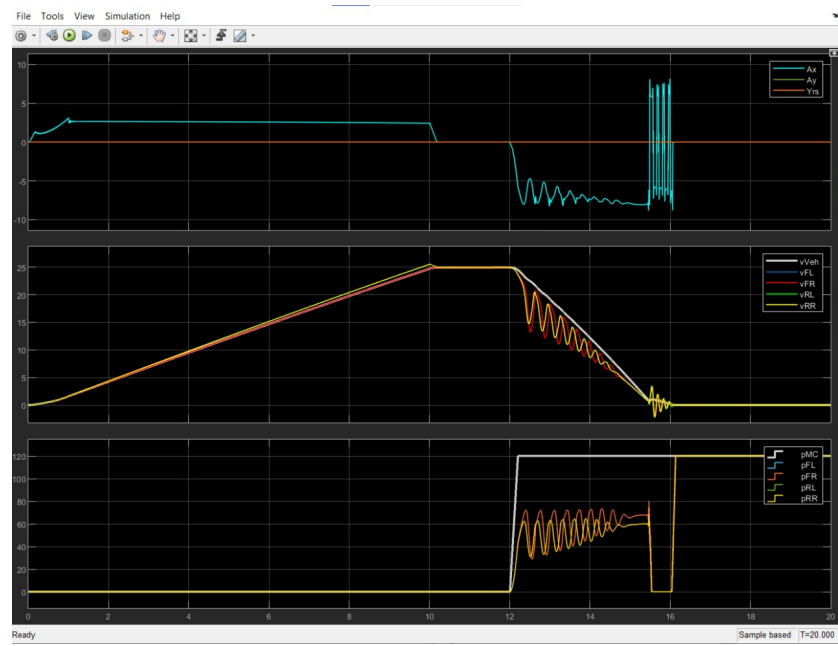


Figure 9: Gráfica del *Scope* en Simulink del T5

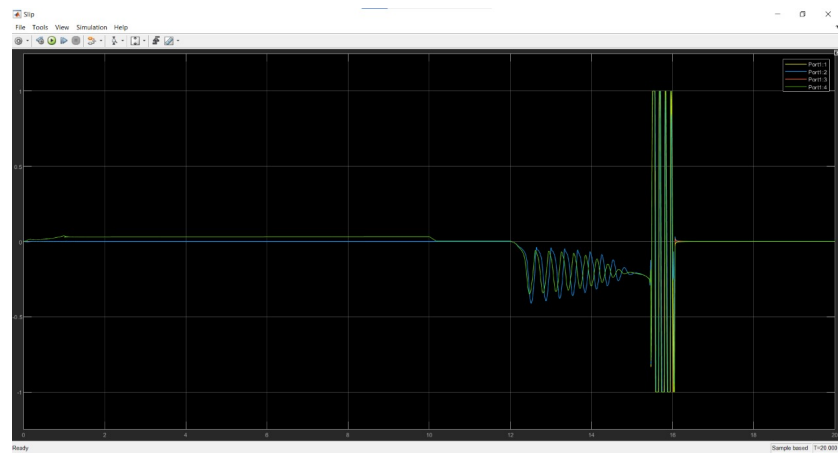


Figure 10: Gráfica del *Slip* en Simulink del T5

4.2 Init_LightAndPanic70.m



Figure 11: Gráfica del *Scope* en Simulink del T3



Figure 12: Gráfica del *Slip* en Simulink del T3



Figure 13: Gráfica del *Scope* en Simulink del T5



Figure 14: Gráfica del *Slip* en Simulink del T5

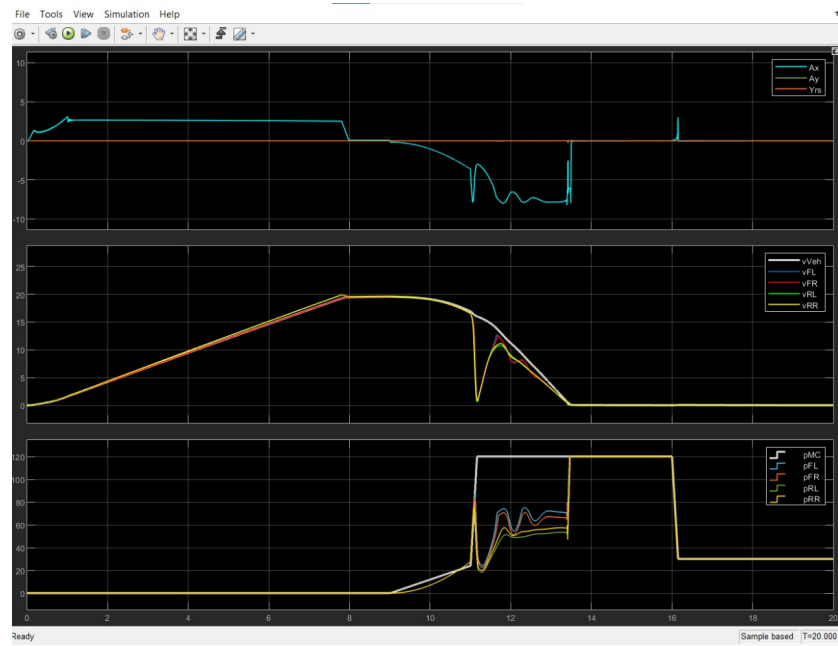


Figure 15: Gráfica del *Scope* en Simulink del T4



Figure 16: Gráfica del *Slip* en Simulink del T4

4.3 Init_HighLow70.m

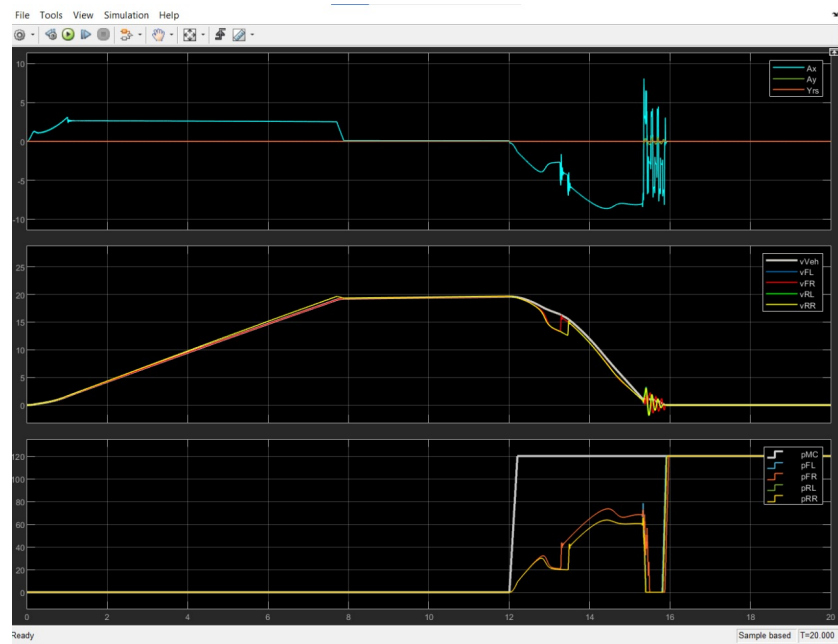


Figure 17: Gráfica del *Scope* en Simulink del T3

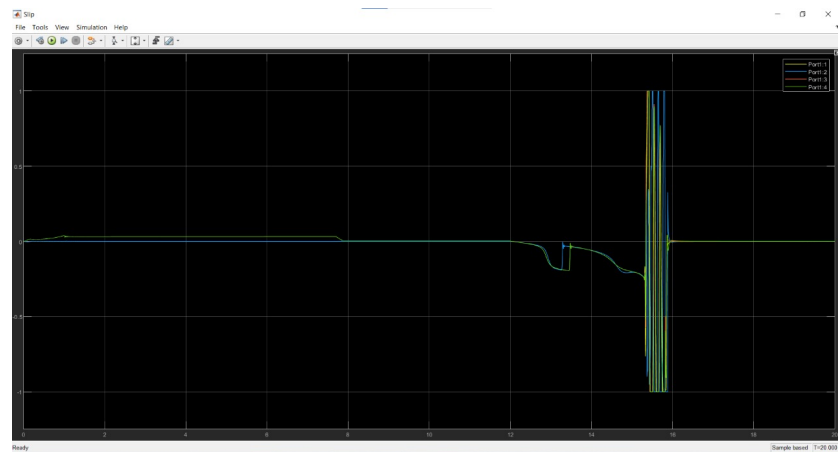


Figure 18: Gráfica del *Slip* en Simulink del T3



Figure 19: Gráfica del *Scope* en Simulink del T4



Figure 20: Gráfica del *Slip* en Simulink del T4

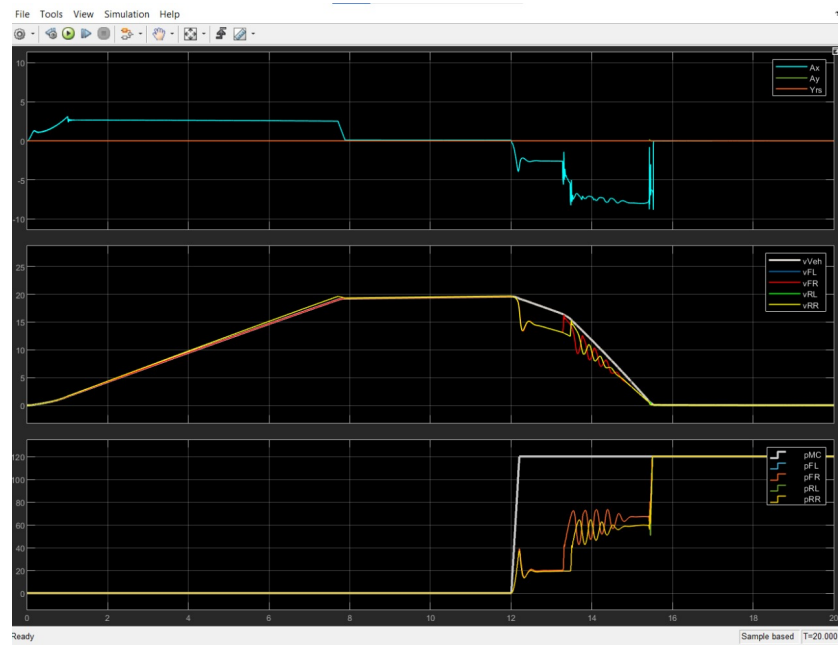


Figure 21: Gráfica del *Scope* en Simulink del T5

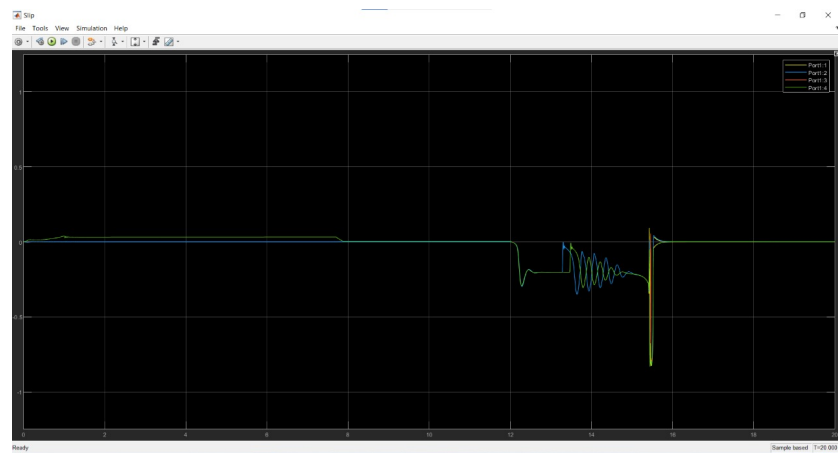


Figure 22: Gráfica del *Slip* en Simulink del T5

5 Análisis de Resultados

Por cuestión de simplicidad, para los tres casos que analizamos decidimos usar los mismos parámetros en el controlador PID y el mismo valor de deslizamiento deseado; los resultados que obtuvimos en cada prueba fueron los siguientes:

5.1 Init_Panic90.m

Los valores que obtuvimos en el intento T5 fueron los mejores, teniendo como resultado:

- Tiempo de frenado: 4.04 segundos.
- Distancia de frenado: 48 metros.

Si estos resultados los comparamos a la prueba que realizamos sin ABS, podemos observar una mejora en la distancia de frenado del 53%. A continuación, se explican los resultados obtenidos en las gráficas del intento T5.

En la gráfica del *Scope* mostrada en la figura 9, al inicio del frenado (aproximadamente en el segundo 12), se empieza a aplicar una presión en MC, la acción del controlador mantiene dicha presión por debajo de la que aplica el conductor; de esta manera se optimiza para mantener el deslizamiento deseado y reduce la velocidad en un menor tiempo.

Por lo tanto, en la gráfica de *Slip* mostrada en la figura 10; al inicio del frenado, el deslizamiento empieza a crecer hasta que la acción del controlador se establece en un valor medio de 0.2 (valor deseado) y posteriormente, a medida que el coche frena ya no hay deslizamiento.

5.2 Init_LightAndPanic70.m

Los valores que obtuvimos en el intento T4 fueron los mejores, teniendo como resultado:

- Tiempo de frenado: 4.55 segundos.

- Distancia de frenado: 60.16 metros.

Si estos resultados los comparamos a la prueba que realizamos sin ABS, podemos observar una mejora en la distancia de frenado del 38%. A continuación, se explican los resultados obtenidos en las gráficas del intento T4.

En la gráfica del *Scope* mostrada en la figura 15, al inicio del frenado ligero (aproximadamente en el segundo 9), se empieza a aplicar una presión equivalente en MC y posteriormente, por el segundo 11 se aplica la presión del freno de pánico. La acción del controlador mantiene dicha presión por debajo de la que aplica el conductor; de esta manera se optimiza para mantener el deslizamiento deseado y reduce la velocidad en un menor tiempo.

Por lo tanto, en la gráfica de *Slip* mostrada en la figura 16; al inicio del frenado, el deslizamiento empieza a crecer hasta que la acción del controlador se establece en un valor medio de 0.2 (valor deseado) y posteriormente, a medida que el coche frena ya no hay deslizamiento.

Cabe destacar que el intento con mejor resultado fue el T5, debido a que frenó en una distancia menor y a un tiempo menor; sin embargo, en la gráfica que muestra la presión aplicada sobre las pinzas de los frenos de la figura 13 se muestra que en cierto momento el valor de la presión aplicada en las pinzas sobrepasa a la aplicada por el conductor en el cilindro maestro, que es el límite establecido. Por dicha razón, decidimos colocar el intento T4 como el mejor de esta prueba.

5.3 Init_HighLow70.m

Los valores que obtuvimos en el intento T5 fueron los mejores, teniendo como resultado:

- Tiempo de frenado: 3.96 segundos.
- Distancia de frenado: 42.27 metros.

Si estos resultados los comparamos a la prueba que realizamos sin ABS, podemos observar una mejora en la distancia de frenado del 40%. A continuación, se explican los resultados obtenidos en las gráficas del intento T5.

En la gráfica del *Scope* mostrada en la figura 21, al inicio del frenado (aproximadamente en el segundo 12), se empieza a aplicar una presión en MC, la acción del controlador mantiene dicha presión por debajo de la que aplica el conductor; de esta manera se optimiza para mantener el deslizamiento deseado y reduce la velocidad en un menor tiempo.

Por lo tanto, en la gráfica de *Slip* mostrada en la figura 22; al inicio del frenado, el deslizamiento empieza a crecer hasta que la acción del controlador se establece en un valor medio de 0.2 (valor deseado) y posteriormente, a medida que el coche frena ya no hay deslizamiento.

6 Conclusiones

A partir del avance que se fue teniendo en el desarrollo de nuestra propuesta para el sistema de frenos antibloqueo y de los resultados de las diferentes pruebas, así como de la resolución de los obstáculos que se nos presentaron, podemos concluir los siguientes aspectos:

- a) *La selección de una referencia de deslizamiento inadecuada puede perjudicar seriamente el funcionamiento del sistema.*

En nuestro caso en particular, en un inicio se tenía seleccionado un valor de referencia para el deslizamiento demasiado bajo, lo que nos trajo muchos problemas no solo con el rendimiento del sistema y el aumento en gran medida del tiempo y la distancia de frenado, sino con la estabilidad del vehículo, ya que al mantener un deslizamiento tan bajo, el sistema no era capaz de adherirse al camino de la mejor manera por lo que cambios en los coeficientes de fricción para cada rueda generaban un viraje en el vehículo, por lo que incluso antes de modificar dicha referencia, teníamos contemplado agregar un algoritmo de control para el viraje cuando en realidad para las pruebas solicitadas no era todavía necesario, ya que dicho viraje pudo corregirse simplemente con el ajuste de dicha referencia.

- b) *Constantes del controlador tienen un gran impacto sobre el rendimiento.*

Pudimos corroborar a partir del barrido que realizamos para seleccionar las constantes K_p , T_i y T_d más apropiadas para nuestro sistema, que

la simple modificación de una de las variables o el ajuste de la relación entre ellas traían cambios considerables en el rendimiento del sistema, pudiendo reducir o incrementar considerablemente según era el caso el tiempo y la distancia de frenado. Además, como ya se mencionó previamente, tuvimos que ajustar al último las constantes seleccionadas en el quinto intento y retomar las usadas en el cuarto intento, ya que el cambio de las constantes entre ambos intentos si bien traían una mejoría en los parámetros de frenado, causaban que se dejara de cumplir uno de los requerimientos, por lo que es de vital importancia la selección de las constantes adecuadas y estar al tanto de todos los cambios que producen sus ajustes.

Finalmente, como áreas de oportunidad para nuestro sistema, consideramos que:

- En un futuro y para mejorar la respuesta de nuestro sistema antes las diferentes pruebas, se podrían considerar variables que no se consideraron en esta ocasión y que puedan ser obtenidas en medida de lo posible a partir del modelo del vehículo, como son las condiciones aerodinámicas, el eje de tracción del vehículo o incluso la distribución de frenado entre ejes, aspectos que podrían traer una mejora para los parámetros de frenado de nuestro diseño.
- Reducción de las oscilaciones del deslizamiento en velocidades muy cercanas a cero. Si bien es cierto que no tienen un gran impacto sobre los parámetros de frenado del sistema al ya estar prácticamente estático el vehículo, lo ideal sería al menos reducir sino es que eliminar por completo dichas oscilaciones.
- Remplazo o complemento del algoritmo de control usado, pudiendo aplicar alternativas como las redes neuronales o bien controladores basados en lógica difusa.