

Diseño y simulación de un controlador ABS de lógica difusa

Alexis Lechuga de los Santos

André Alberto Contreras Rivera

26 de diciembre del 2021

1 Introducción

El reto de este proyecto consistió en diseñar e implementar un control difuso de frenos antibloqueo, mejor conocido como *ABS – Antilock Braking System*. Los sistemas de frenos ABS tienen muchas bondades y beneficios. Muchos de los vehículos que actualmente se comercializan contienen sistemas avanzados de frenos ABS, estos resultan ser muy complejos.

El control podía servirse únicamente de las señales proporcionadas por los sensores que se presentan a continuación:

- Sensor de presión en el cilindro maestro.
- Un sensor de velocidad angular en cada rueda.
- Unidad de Medición Inercial (IMU, por sus siglas en inglés).

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.

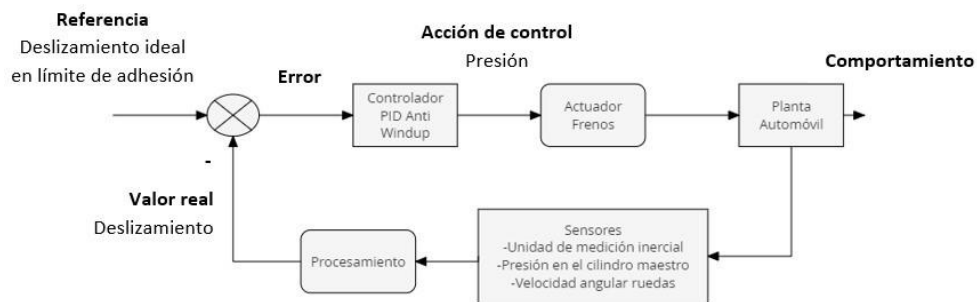


Figure 1: Diagrama de bloques del sistema

Tenemos un valor como referencia ideal de deslizamiento para las ruedas, sin embargo, es necesario hacer un cálculo para obtener el deslizamiento real que están teniendo las ruedas con los datos obtenidos de los sensores y un procesamiento realizado por el programa.

Esto para obtener el error de deslizamiento que se está teniendo, el cual pasa por un proceso de control con lógica difusa que genera una acción de control para la presión de las pinzas de los frenos.

Adicional a esto, añadimos un bloque de control de viraje en el cual se procesa la información tanto del viraje calculado de igual forma por el procesamiento en el programa de la información de los sensores, así como la acción de control generada en el bloque de control de lógica difusa, esto para generar una acción de control adicional que se integrará cuando sea necesario forma sobre los frenos del automóvil para tratar de evitar el viraje.

Posteriormente se explicará con más detalle el funcionamiento tanto del sistema general, como de cada uno de los bloques mencionados, así como el motivo y los fundamentos que tomamos a la hora de tomar las decisiones de diseño de nuestro 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 como ya se mencionó 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.

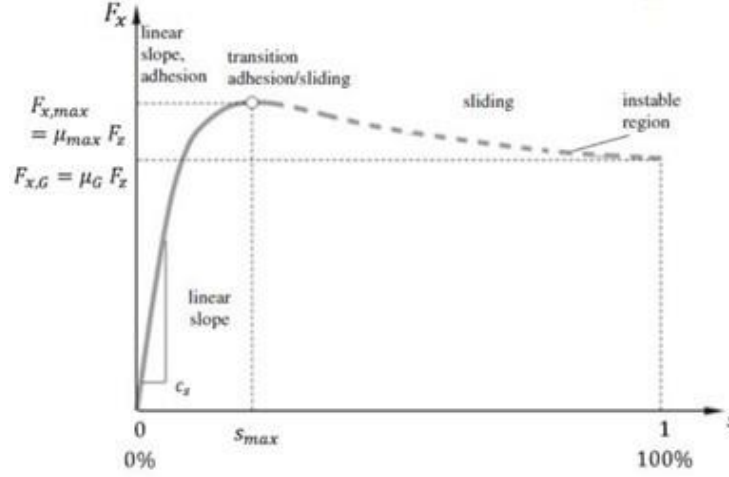


Figure 2: Gráfica del deslizamiento con respecto a la fuerza

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.

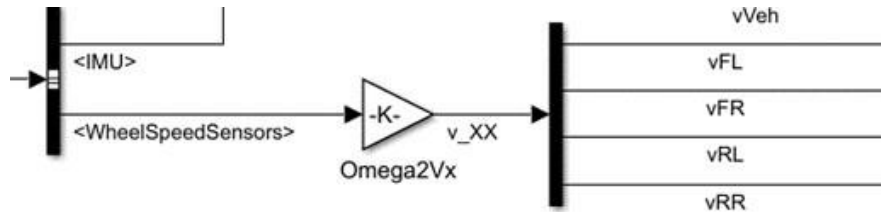


Figure 3: Diagrama de los sensores de las ruedas en Simulink

2.4 Mecanismo de Control

En esta ocasión se procedió a realizar un controlador con lógica difusa para poder controlar la presión aplicada sobre las pinzas en cada una de las llantas del coche. Para ello nos basamos en una serie de teorías para modelación, control, algoritmos computacionales e inteligencia artificial, que se basan en un razonamiento de incertidumbre o imprecisión sin límites cortantes.

Nuestro bloque de control con lógica difusa está representado de la siguiente manera:

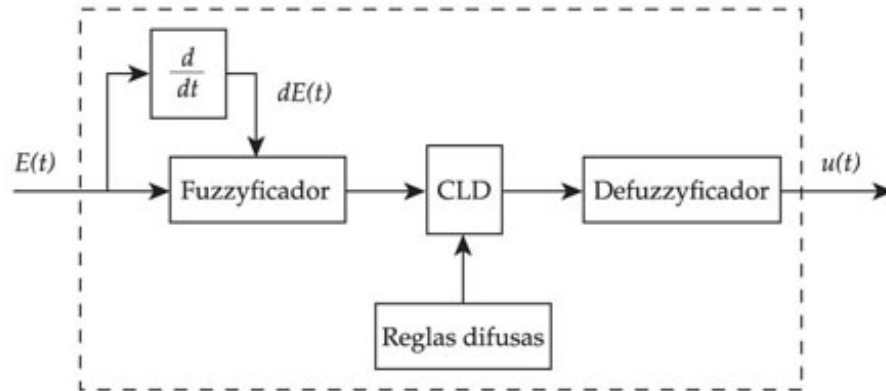


Figure 4: Diagrama de bloques de un controlador de lógica difusa

En la imagen se muestran las diferentes etapas que conforman el controlador difuso, entre las que se encuentran la fusificación de los datos de entrada (funciones de membresía), la cual se verá controlada por las reglas difusas que determinarán la información importante, y por último nuestro defuzzificador del cual saldrá nuestra señal de salida para controlar en nuestro caso la presión aplicada sobre los neumáticos.

Además, agregamos un bloque de control para poder anular o contrarrestar el viraje que se presentaba durante la simulación de la prueba debido a las condiciones de esta, bloque que se explicará también con más detalle posteriormente.

El diagrama que se muestra a continuación representa nuestro sistema antibloqueo, más el control difuso propuesto, y adicionalmente el controlador sencillo para evitar el viraje excesivo del automóvil que agregamos.

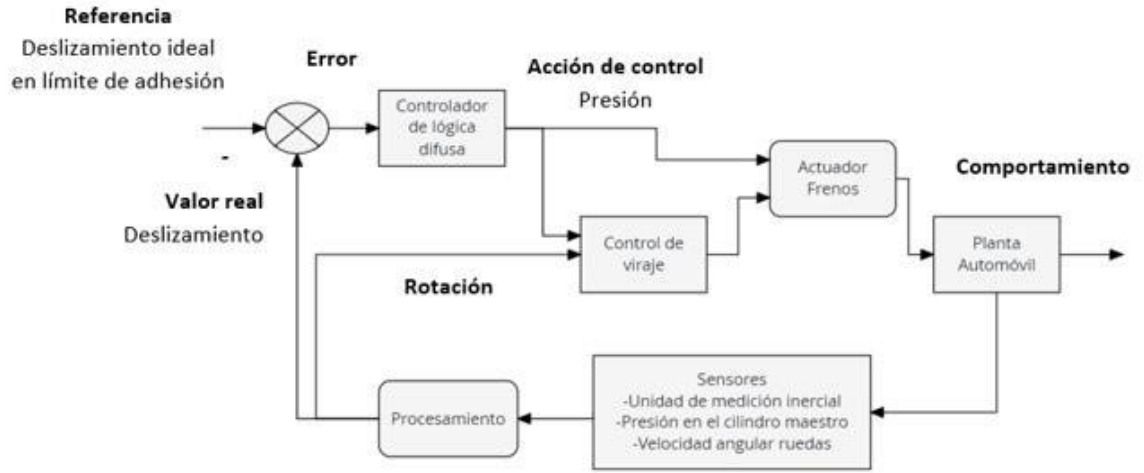


Figure 5: Diagrama de bloques de sistema difuso antibloqueo

2.4.1 Funciones de Membresía

Las funciones de membresía (MF) representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta.

Existe una gran variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son del tipo trapezoidal, triangular y singleton.

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{for } x > c \end{cases} \quad \text{triangular}$$

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ 1, & \text{for } b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{for } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{for } x > d \end{cases} \quad \text{trapezoidal}$$

$$\mu_F(x) = e^{-(x-c_F)^2/w} \quad \text{Gaussian}, \quad \mu_F(x) = \frac{1}{1 + (x - c_F)^2} \quad \text{bell-shaped}$$

Figure 6: Fórmulas para obtener las funciones de membresía

Para nuestro sistema, decidimos utilizar el tipo triangular para calcular las pendientes de cada conjunto. Se utilizó la función “ $x-a/b-a$ ” para la etapa creciente y “ $c-x/c-b$ ” para la etapa decreciente, así como la asignación de un valor de 0 o 1 cuando estaban dentro o fuera de ciertos vértices dados.

Nuestras funciones de membresía representan el error de deslizamiento calculado por el programa con cada iteración del proceso de las señales de los sensores.

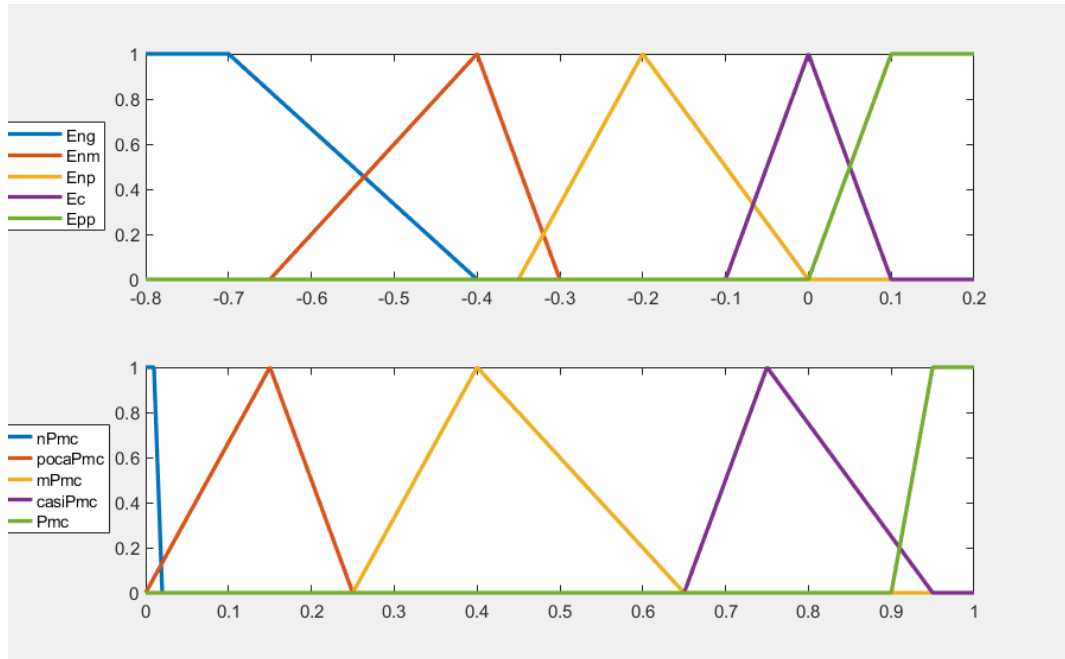


Figure 7: Funciones de membresía de entrada y salida

En donde la gráfica superior representa las MF de Entrada: Error negativo grande, Error negativo medio, Error negativo pequeño, Error cero, y Error positivo pequeño. Y la gráfica inferior las MF de Salida: Nada en relación con la presión del Cilindro Maestro, poca, media, casi toda, y toda la presión del cilindro Maestro.

2.4.2 Reglas difusas y curva de control

Las reglas difusas son condiciones de control relacionados con el error de deslizamiento determinado en Las funciones de membresía y la asignación del valor de la presión que debe aplicar el cilindro maestro según indique dichas reglas. Con esto, se genera la curva de control, en

conjunto con las funciones de membresía que definimos tanto para la entrada como para la salida, la cual es de gran ayuda para visualizar la respuesta que pudiera tener el controlador ante cierta entrada.

A continuación, se muestran las reglas difusas y la gráfica de la superficie de control obtenida:

Error de deslizamiento		Presión	
If	Eng	then	nPmc
If	Enm	then	pPcm
If	Enp	then	mPcm
If	Ec	then	cPcm
If	Epp	then	Pcm

Figure 8: Reglas difusas

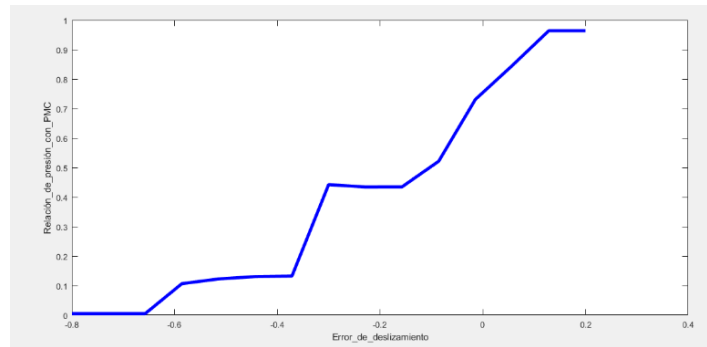


Figure 9: Superficie de control

2.4.3 Fuzzificación

En la fuzzificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas (figure 10).

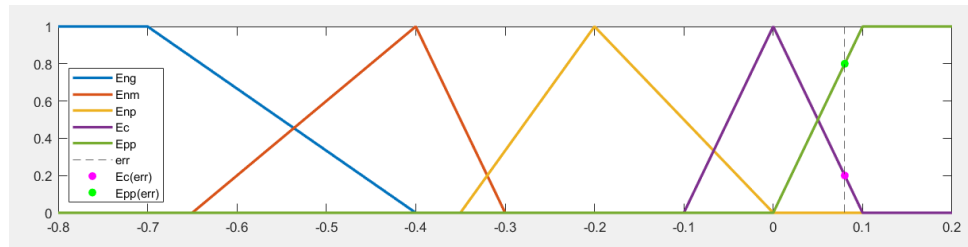


Figure 10: Fuzzificación de las funciones de membresía de entrada

Es aquí donde obtenemos la posición del error de deslizamiento (err) dentro del arreglo que contiene los errores de cada neumática para posteriormente evaluar el error de deslizamiento en ese índice para encontrar el error exacto en ese momento para cada función de membresía donde se intercepta ese valor (Ec , Epp) y utilizarlo posteriormente en la inferencia. Cabe destacar que las funciones que no interceptan con dicho valor su resultado es equivalente a cero, o una línea plana en el eje x.

2.4.4 Método de inferencia Mamdani

En este método, debemos obtener los mínimos de las funciones de membresía de salida usando los puntos exactos del error (Ec , Epp) previamente calculados; en otras palabras, debemos “cortar” las funciones de membresía de salida en dichos puntos exactos del error calculados en la fuzzificación, como se muestra en la siguiente figura.

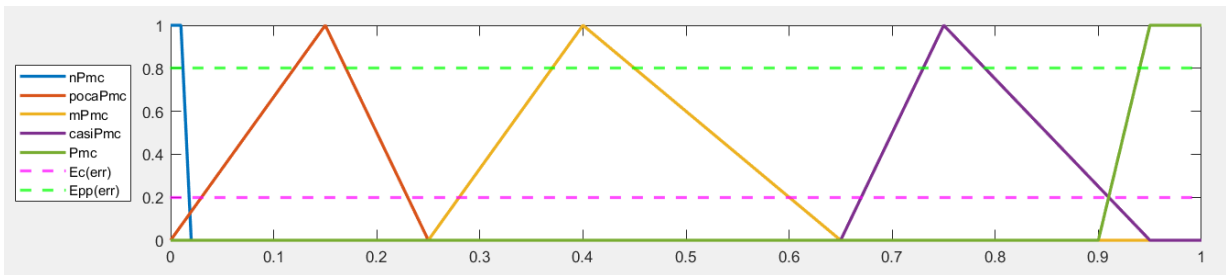


Figure 11: Método de inferencia de Mamdani

Obteniendo figuras parecidas a un trapecio en las funciones de membresía de salida resultantes, como se muestra en la figura 12.

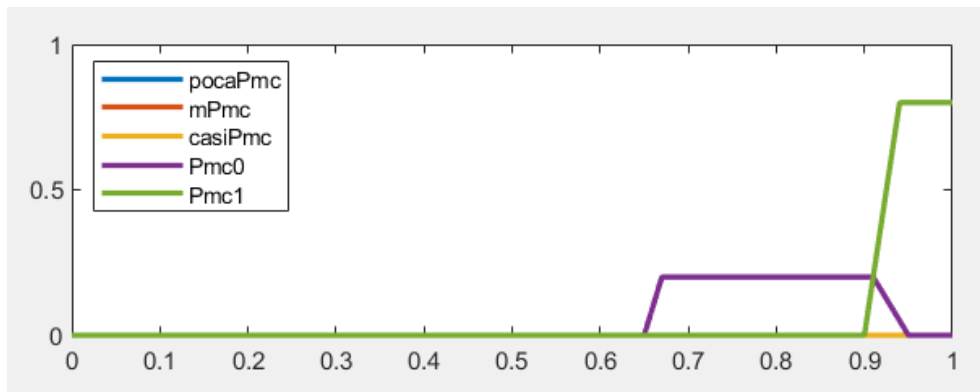


Figure 12: Funciones de membresía de salida cortadas

Posteriormente, debemos obtener el máximo de los mínimos calculados anteriormente, lo cual nos deja una figura irregular producto de las figuras tipo trapecio. En la siguiente gráfica se muestra dicha figura irregular (que es la gráfica con los máximos de los mínimos de las funciones de membresía de salida).

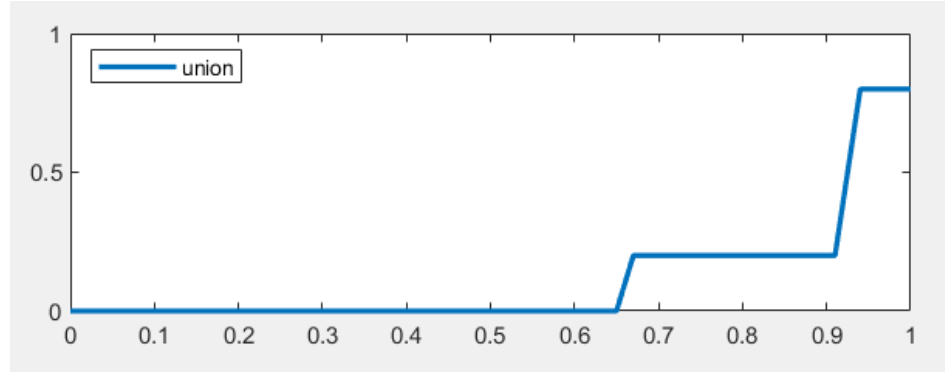


Figure 13: Gráfica resultante de la inferencia

2.4.5 Defuzzificación

Conocido como “Fuzzy Reasoning”, en esta etapa de control encontramos el valor crisp que va de salida al proceso. En nuestro caso utilizamos el método del centroide, en el cual se tiene un conjunto difuso como salida de la etapa de agregación y se requiere un valor concreto (el valor del centro del área bajo la curva)

En nuestro caso, para la codificación del método usamos la fórmula que es la sumatoria de la multiplicación de cada uno de los valores del conjunto difuso que llamamos “union” evaluado en cada uno de los valores del vector “y” multiplicado por cada uno de los valores del vector “y”, dividido entre la sumatoria de la multiplicación de cada uno de los valores del conjunto “union” evaluado en cada uno de los valores del vector de salida (véase siguiente imagen).

$$C = \frac{\sum_{i=0} Union(y)_i \cdot y_i}{\sum_{i=0} Union(y)_i}$$

Figure 14: Fórmula para obtener el centroide

Como se puede apreciar, el centroide está cerca del valor de 0.9:

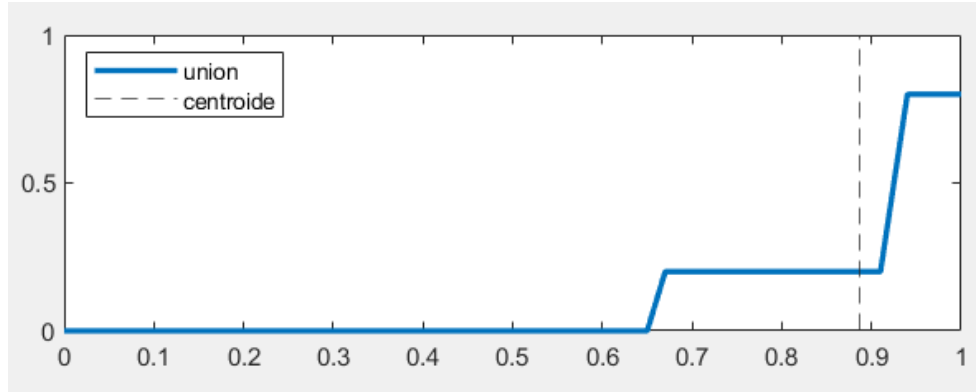


Figure 15: Localización del centroide en este ejemplo

2.4.6 Control de viraje

Para el control de viraje del vehículo se calculó el Yaw que se está teniendo a partir de la integración del Yaw Rate, la cual se realizó utilizando el principio de calcular el área bajo la curva con la suma de riemann, teniendo la sumatoria de los rectángulos con base dt y altura Yaw Rate (véase imagen ilustrativa).

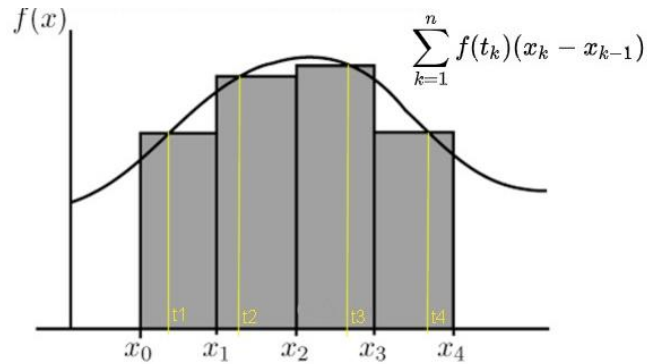


Figure 16: Ejemplo ilustrativo de la sumatoria de Rienman

Ante la ausencia de ajustes a través del sistema de dirección y del volante, la manera que ideamos para provocar un viraje en el sentido contrario al viraje que se detecte del coche para contrarrestarlo es haciendo que las ruedas que quedan en el interior de la dirección hacia dónde queremos trazar la curva funcionen como una especie de pivote.

Para ello dentro de este bloque de control se crearon condiciones para ajustar a través de una constante proporcional la presión, calculada por el bloque de control de lógica difusa, de las llantas que se requieran como pivote con un ajuste fijo de acuerdo con el sentido de viraje y la fricción.

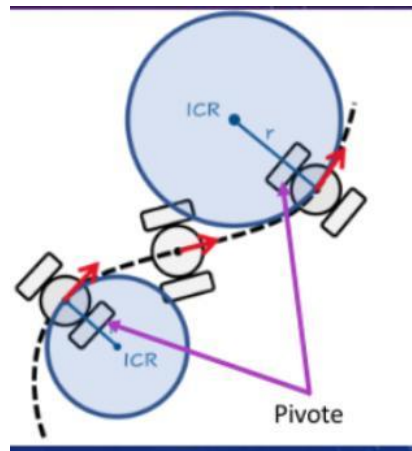


Figure 17: Ejemplificación del viraje por medio de un pivote

Es decir, si el viraje que se detecta del automóvil es hacia la derecha, se buscaría que las llantas del lado izquierdo tuvieran un mayor frenado que las del lado derecho para causar un viraje hacia la izquierda que contrarrestara al existente, y para hacerlo considerando que la fricción que tienen dichas ruedas con el pavimento es mayor, se aumenta la presión ejercida sobre esas llantas, cumpliendo con este objetivo. En cambio si el viraje detectado fuera hacia el lado izquierdo, se buscaría frenar más las llantas del lado derecho y a pesar de que lo más lógico sería también aplicar una mayor presión sobre esas ruedas, se detectó que esto en realidad causa que se deslicen debido a que su coeficiente de fricción es mucho menor, por lo que después de muchas pruebas y validaciones, se decidió reducir la presión sobre esas llantas lo cual en realidad causaba que no se deslizaran y por ende tuvieron un mayor frenado que las del lado opuesto.

Cuando se detecta un viraje hacia la izquierda en el vehículo, se multiplica el valor de presión para las ruedas derechas calculado a la salida del controlador de lógica difusa por una constante de 0.6, mientras que cuando se detectaba un viraje hacia la derecha, se multiplica el valor de la presión para las ruedas izquierdas calculado en el controlador de lógica difusa por una constante de 1.4.

3 Validación y progreso

3.1 Prueba de validación

En esta ocasión la prueba realizada para nuestra propuesta del sistema de frenos antibloqueo fue la siguiente:

PRUEBA INIT SPLIT70

El conductor aplicaba un freno de pánico a 70km/h, estando ya el automóvil en una superficie dividida, es decir las ruedas del lado derecho tenían un coeficiente de fricción mucho menor que las de la izquierda, en este caso porque se encontraban en tierra y pavimento respectivamente.

Los valores de las condiciones detalladas son las siguientes:

- I. Velocidad inicial: 70km/h (+/-2km/h)
- II. Viraje: 0° (constante).
- III. Se aplica pedal de freno a fondo. El conductor suelta el volante y queda en 0°
- IV. $\mu = [0.90, 0.4]$ (izquierda, derecha)

3.2 Progreso

A lo largo de la realización del proyecto se realizaron múltiples cambios, pero hubo ciertas modificaciones que tuvieron un gran impacto sobre el rendimiento de nuestro sistema.

Para empezar originalmente las reglas difusas que habíamos definido no contemplaban tener una salida de una presión con un valor cercano a la nulidad, lo cual causaba que , al no poder disminuir el deslizamiento existente en las ruedas ya que para hacerlo se necesitaba un valor de presión menor al que habíamos establecido, el controlador se estabilizara en el valor más bajo que teníamos definido como salida, lo cual no era deseable y generaba que no existiera mucha mejoría respecto al sistema sin el ABS activado. Esto se muestra en la figura siguiente.

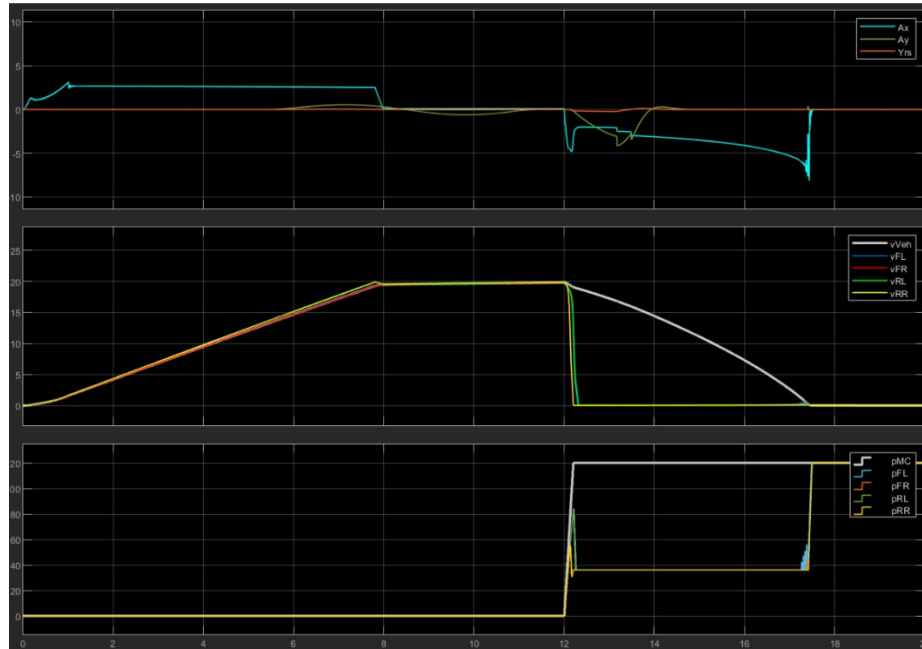


Figure 18: Gráficas del Main Scope en Simulink (aceleración, velocidad y presión sobre los neumáticos)

Posteriormente, una vez resuelto ese problema y habiendo ajustado las reglas, notamos que las funciones de membresía que teníamos definidas de la siguiente forma:

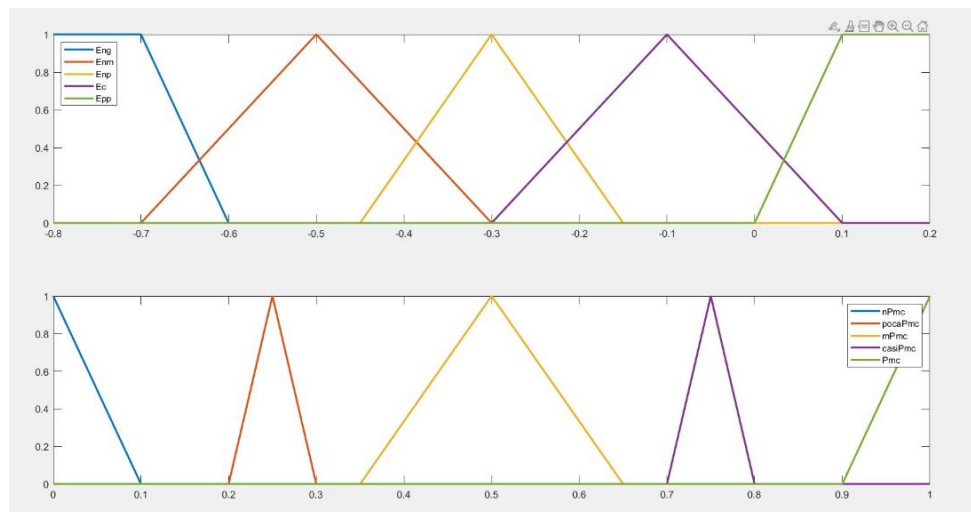


Figure 19: Funciones de membresía de entrada y salida

tenían un campo de mejora, ya que notamos que se podía mejorar el control sobre el deslizamiento de las ruedas izquierdas, considerando que eran las que no se veían tan afectadas por el control simultaneo implementado para contrarrestar el viraje y ya que tenían el coeficiente de fricción mayor para que pudieran alcanzar más rápidamente el valor del deslizamiento en 0.2 deseado, como se puede observar en la siguiente imagen.

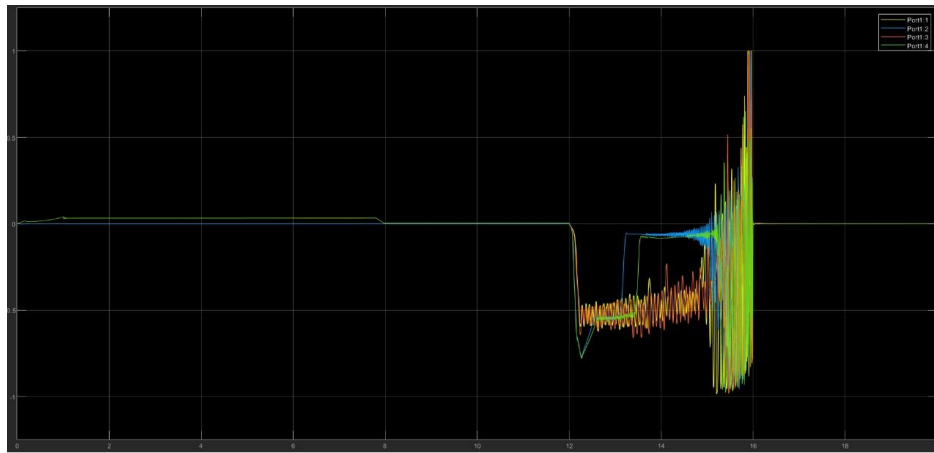


Figure 20: Gráfica del Slip en Simulink de la prueba

Por ello modificamos varias ocasiones las funciones de membresía, hasta que llegamos a las mostradas en la sección 2.4.1 las cuales fueron las que nos dieron los mejores resultados.

Adicionalmente modificamos varias veces la constante de proporcionalidad utilizada dentro del bloque de control del viraje, hasta llegar a los mostrados en la sección 2.4.6, que de igual forma fueron las que nos entregaron los mejores resultados.

4 Mejores Resultados

Después de todas las modificaciones realizadas a nuestro sistema y a los 2 bloques de control, los mejores resultados obtenidos fueron los siguientes:

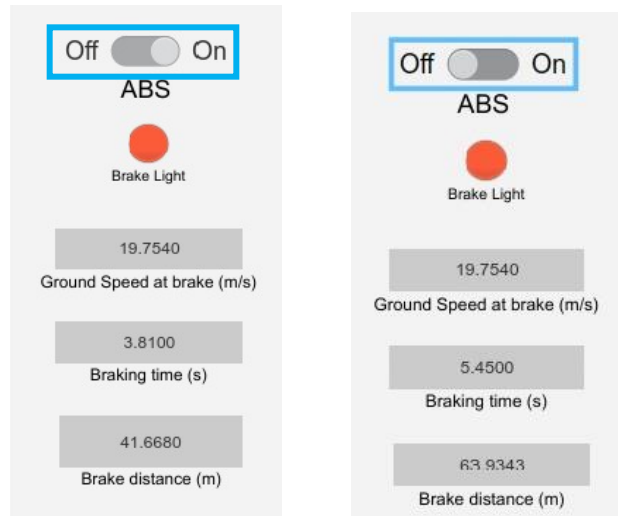


Figura 21 y 22: Comparación del tiempo del tiempo y la distancia de frenado con el sistema antibloqueo activado y desactivado respectivamente.

De manera puntual, el mejor desempeño de la prueba fue el siguiente

- Reducción en un 30.09 % del tiempo de frenado
- Reducción en un 34.83% de la distancia de frenado
- Reducción de viraje y mantenerse dentro de los límites del carril

A continuación, se muestran las gráficas de este:

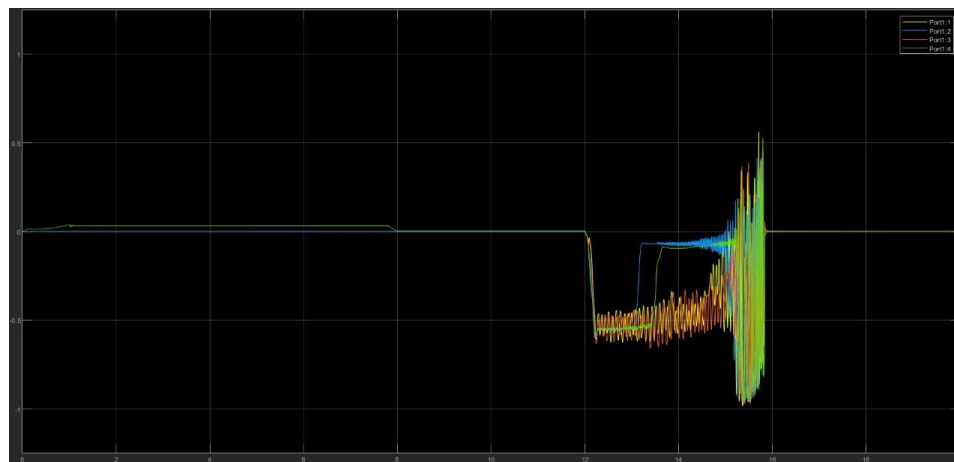


Figure 23: Gráfica del Slip en Simulink del mejor resultado

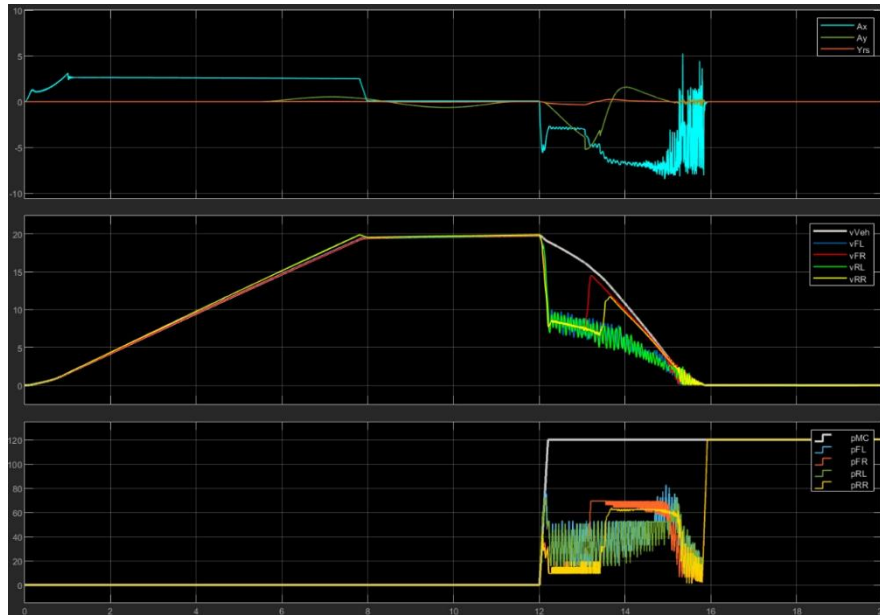


Figure 24: Gráficas del Main Scope en Simulink (aceleración, velocidad y presión sobre los neumáticos) del mejor resultado

Cómo se puede apreciar en la figura 24, en la gráfica del Scope al inicio del frenado (aproximadamente en el segundo 12), se empieza a aplicar una presión en MC. La acción del controlador difuso mantiene dicha presión por debajo de la que aplica el conductor para cada uno de los neumáticos; de esta manera se optimiza el control (idealmente) para mantener el deslizamiento deseado y reduce la velocidad en un menor tiempo.

Adicionalmente, en esta prueba existen variaciones en la aceleración lateral del coche debido a que en la prueba las ruedas de la derecha del automóvil se salen a la tierra lo cual produce mucho viraje porque el coeficiente de fricción es distinto y al aplicar el freno ocurre una diferencia entre las velocidades de cada una de las llantas. Además, entre nuestro controlador difuso y el desarrollado para el viraje, existen momentos en los cuales no se integran bien entre sí, afectando al deslizamiento de las ruedas, razón por la cual en ocasiones obtenemos valores diferentes (como 0.5) los esperados (0.2).

En la gráfica de Slip mostrada en la figura 23; al inicio del

frenado, el deslizamiento empieza a crecer y se ven variaciones distintas en el deslizamiento de cada neumático, esto debido a que el sistema difuso aplica diferentes presiones según la información de los sensores y la programación de este tipo de control. A medida que va frenando, va disminuyendo el deslizamiento hasta terminar el movimiento.

5 Conclusiones y áreas de oportunidad

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 que íbamos realizando, así como de la resolución de los obstáculos que se nos presentaron, podemos concluir los siguientes aspectos:

a) Importancia de la ubicación de las MF's y de las reglas de control.

Es importante tener definidas las reglas de fuzzificación y las funciones de membresía de la manera más eficiente para poder lograr un mejor control en las señales de salida ya que tienen una acción directa sobre la presión aplicada en cada una de las ruedas en relación con la que aplica el conductor sobre el cilindro maestro. Mientras mejor sea la definición de las funciones de membresía, mejor será el rendimiento del sistema.

b) La superficie o curva de control en nuestro caso contribuye a identificar cómo optimizar el rendimiento.

Una curva o superficie de control puede ayudarnos para poder desarrollar un programa que muestre un mayor rendimiento al aplicarse en un sistema como lo es el nuestro. Si logramos identificar cómo optimizar el control, podremos disminuir costos tanto materiales como inmateriales (tiempo).

- Ajuste para mantener de forma más precisa el deslizamiento en el valor deseado de 0.2 en las ruedas que se encuentran con el coeficiente de fricción menor.
- Control de viraje que en lugar de ser fijo sea adaptable a través de otro método de control, por ejemplo, PID o de lógica difusa.
- Optimizar la integración simultánea del control de

deslizamiento y de viraje, sobre todo sin que el segundo afecte el rendimiento del primero en ningún momento.

- Se podrían obtener mejores resultados al considerar la distribución de frenado entre ejes.