

**FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS SYSTEM DESIGN BASED ON
EXHAUST GAS O₂ INDEX CONTENT IN DIESEL MOTORS****SISTEMA PARA LA DETECCION Y DIAGNOSTICO DE FALLAS BASADO
EN LA MEDICIÓN DEL INDICE DE O₂ EN GASES DEL ESCAPE DE
MOTORES DIESEL**

Ing. Fernando Puerta H., PhD. Rocco Tarantino A., M.Sc. Sandra Aranguren Z.

Universidad de Pamplona

Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas (IIDTA)

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 156.

E-mail: {ferpuerta, roccot, saranguren}@unipamplona.edu.co

Abstract: The fault detection and diagnosis systems are necessary for quality, reliability and durability improvement of industrial processes systems, as well as, medical, nutritious processes, among others. This work uses the advances of the fault detection and diagnostic systems, to identify incipient and fault potentials in diesel motors, based on the exhaust oxygen measurement. The main objective is to evaluate and to diagnose possible fault in motor operation, alerting to the maintenance personnel. Likewise, the system gives a detailed report of the evaluation made to the motor.

Resumen: Los sistemas de detección y diagnóstico de fallas son necesarios para el incremento de la calidad, confiabilidad y durabilidad de los sistemas que conforman los procesos industriales, así como, procesos médicos, alimenticios, entre otros. Este trabajo utiliza los avances de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas, para identificar fallas incipientes y potenciales en los motores diesel, basado en la medición de oxígeno (O₂) en los gases de escape. El objetivo es evaluar y diagnosticar posibles fallas en el funcionamiento del motor, alertando con esto al personal de mantenimiento. Así mismo, el sistema suministra un informe detallado de la evaluación hecha al motor.

Keyword: Diesel motors, fault detection and diagnosis, gas exhaust, probe Lambda, UEGO

1. INTRODUCCION

Los avances y evolución de las filosofías de diagnóstico y detección de fallas, han permitido la creación de mejores sistemas, reducción del número de horas fuera de servicios de equipos, identificación de fallas, diagnóstico, pero sobre todo ha creado la conciencia de la confiabilidad en cada uno de los procesos desarrollados, entendida esta como requerimiento esencial para garantizar la continuidad y buen desempeño de la maquinaria y

por ende de los procesos asociados a ella. Un sistema de detección y diagnóstico de fallas a partir de la medición de los gases de escape permite un primer acercamiento a la identificación de fallas incipientes del motor sin necesidad de extraer sus piezas y mecanismos para descartar posibles fallas de subsistemas internos.

Obviamente al ser un sistema que maneja una sola variable del proceso, el diagnóstico efectuado no dará fe del 100% de la dinámica del motor, pero si

permitirá descartar algunas falsas fallas y sobre todo ahorrar tiempo y dinero que se pierden al inmovilizar un auto para ser sometido a observación. Aun así, con esto se estará evitando que el motor llegue a posibles fallas funcionales mucho más delicadas que puedan sacarlo de circulación por tiempos.

La detección y diagnóstico de fallas a nivel de medición de gases para motores de combustión interna, no ha sido aprovechada en su totalidad como tal; estos sistemas de medida de gases están orientados mas que todo al control ambiental mediante la identificación de índices normales de sustancias emitidas (CO , NO_x , CO_2 , etc.) en los gases de escape. No obstante se ha usado el control de medición de la relación aire/combustible en motores de gasolina con el fin de disminuir la cantidad de combustible utilizado mediante sistemas de control con centralitas electrónicas incluidas en el auto, que censan los gases de escape a la salida del motor, envían la información a la unidad de control y esta se encarga de aumentar o disminuir la cantidad de combustible inyectado, en función de la medida recibida. Sin embargo la medición de los gases de escape a la salida del motor permite identificar en que condiciones se encuentran el motor, si realizamos el análisis adecuado que nos lleve a identificar las causas de ese funcionamiento anormal y sus posibles consecuencias de no someterlo a revisión en el tiempo adecuado.

1.1. Detección de Fallas

La detección de fallas consiste en tomar información por medio de mediciones de variables de proceso y de ecuaciones que representan el sistema en perfecto funcionamiento y realizar un respectivo análisis y estudio de las salidas para detectar cualquier anomalía ante posibles perturbaciones dentro del sistema o subsistema que conforman un sistema mucho mayor. Después que se ha hecho la respectiva detección se realiza un diagnóstico minucioso que permita realizar un mantenimiento que mantenga al sistema dentro de los parámetros nominales de funcionamiento y evite su deterioro progresivo. (Tarantino, 2004). El diagnóstico de fallas de motores de combustión interna se puede definir como la investigación de los síntomas y acontecimientos que llevan a la detección y aislamiento de la falla causante de una irregularidad de su funcionamiento, que se manifiesta con frecuencia como una disminución de su eficiencia. (Figueroa, 1997)

2. MOTORES DIESEL

Un motor diesel funciona mediante la ignición de la mezcla aire-gas sin chispa. La temperatura que inicia la combustión procede de la elevación de la presión que se produce en el segundo tiempo motor, compresión. El combustible diesel se inyecta en la parte superior de la cámara de compresión a gran presión, de forma que se atomiza y se mezcla con el aire a alta temperatura y presión. Como resultado, la mezcla se quema muy rápidamente. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando el pistón hacia abajo. La biela transmite este movimiento al cigüeñal, al que hace girar, transformando el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación. Para que se produzca la autoinflamación es necesario emplear combustibles más pesados que los empleados en el motor de gasolina, empleándose la fracción de destilación del petróleo comprendida entre los 220 y 350° C, que recibe la denominación de gasóleo. La principal ventaja de los motores diesel frente a los motores de gasolina estriba en su menor consumo de combustible, el cual es, además, más barato. Por esta razón su uso se ha extendido en aplicaciones con elevada tasa de utilización. (Nyeb, Robert 1997).

La figura muestra un motor diesel DDEC serie 60, con ciclo de cuatro tiempos, para camión de trabajo pesado, equipado con inyección electrónica de combustible, árbol de levas en la parte superior y postenfriador de aire a aire. (Nyeb, Robert 1997).

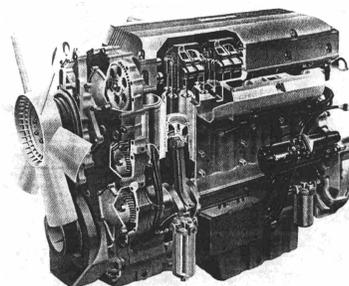


Fig. 1: Motor diesel DDEC serie 60
(Cortesía de Detroit Diesel)

2.1. Sistema de Escape de Aire

Todos los motores de combustión interna necesitan un suministro de aire que esté limpio, seco y fresco. El aire húmedo contiene menos oxígeno que el aire seco, por lo cual se reduce la potencia del motor. La falta de suficiente flujo de aire a un motor puede provocar las siguientes condiciones:

- Alta restricción de entrada de aire
- Mayores temperaturas de escape
- Combustión incompleta
- Menor economía de combustible
- Falta de potencia
- Humo en el tubo de escape
- Aumento de emisiones de escape
- Vida más corta de válvulas y pistones
- Operación más ruidosa
- Aumento de uso de aceite de lubricación

La figura 2 muestra los cuatro tiempos del motor en los cuales tanto la inyección adecuada de combustible como el flujo de aire suministrado son decisivos para una correcta combustión del motor.

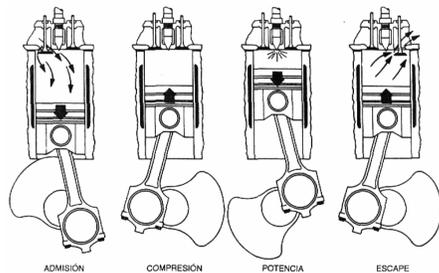


Fig. 2: Ciclos en un motor diesel de cuatro tiempos

2.2 Fallas en motores diesel asociadas a los gases de escape

Las fallas en motores diesel asociadas a los gases de escape, son producto de una serie de perturbaciones producidas en su conjunto a diversos factores dentro de los cuales los más usuales son:

Desgaste en válvulas: El desgaste de las válvulas de la cámara de compresión, las cuales permiten el acceso y salida de los gases de la combustión en el motor, conllevan a procesos intermedios tales como combustión incompleta o exceso de aire en las cámaras. Ambos procesos son perjudiciales para la vida útil del motor y su manifestación más clara la vemos en los gases de escape por ejemplo en el color de humo; sin embargo midiendo el nivel de los componentes de esa mezcla gaseosa tendremos certeza que ocurre en realidad en el proceso de combustión.

Desgaste de anillos y camisas: El desgaste es producido por el roce abrasivo entre las piezas cuando no hay la suficiente lubricación; este desgaste provoca defectos en las piezas las cuales afecta el proceso de combustión al no estar en condiciones óptimas la cámara de combustión. (Figueroa, 1997).

Entrada de aire: Influye mucho en el proceso ya que va ligado a otros factores tales como condiciones ambientales, altura a nivel del mar, presión de los gases a la entrada y temperatura de los gases.

Inyectores de combustible: Los inyectores de combustible proporcionan de manera adecuada la cantidad de combustible adecuada (atomizada) para que el proceso de combustión se lleve a cabo eficientemente. Inyectores defectuosos generan en la cámara de combustión excesos o déficit de combustible, los cuales conllevarán a un proceso incompleto de combustión en el motor, disminuyendo su eficiencia. (Nyeby, Robert 1997)

La figura 3 muestra el recorrido de los gases de escape en el proceso de combustión dentro del motor hasta la salida por el tubo de escape; en todo este proceso pueden estar presente las fallas antes descrita y en su recorrido por todo este proceso, los gases de escape llevan información valiosa del estado de los subsistemas del motor.

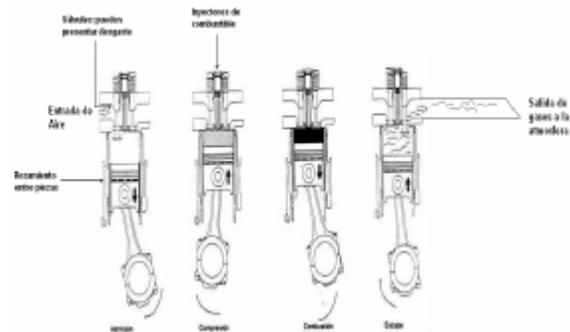


Fig. 3: Recorrido del aire hasta la salida del tubo de escape

3. SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS PROPUESTO

El sistema propuesto para detección y diagnóstico de fallas, permite analizar una muestra de gases de escape de un motor diesel, midiendo el índice de oxígeno de los gases. Las muestras tomadas del sistema de escape de los vehículos, deberá siempre estar bajo las mismas condiciones de presión, temperatura, y libre de otros gases en un máximo porcentaje, con el fin de crear con esto unas condiciones óptimas para las mediciones que se quieran realizar; mantener estos factores nos garantizará que estaremos trabajando bajo las mismas condiciones de muestreo. Esto se garantiza empleando en el proceso de recolección de muestras de gases, un equipo de acondicionamiento

de muestras gaseosas, el cual mantendrá siempre la muestra de gases bajo condiciones óptimas sin variación en la concentración de sus componentes y temperatura.

Tal equipo es parte del trabajo en la medida que permite que las mediciones a realizar sean satisfactorias y no varíen por factores como la temperatura ambiente, la altitud y la presión, garantizando con esto que el sistema de fallas puede ser usado en cualquier región del país. Bajo las anteriores observaciones, el sensor lambda de oxígeno es introducido en la muestra y una vez se realiza la medición envía una señal de voltaje de 0 a 1 voltio dependiendo el grado de concentración de la mezcla aire/combustible. Esta señal pasa a un amplificador de instrumentación y de allí a un conversor análogo/digital de resolución de 8 bits para ser transmitido por puerto paralelo a un PC, donde se lleva a cabo el proceso de análisis.

La figura 4 muestra un esquema general del circuito utilizado en la toma y almacenamiento de los niveles de oxígeno medidos por la sonda lambda. Inicialmente la sonda es introducida en la muestra gaseosa; la señal que produce el sensor, es amplificada y filtrada pasando luego a un proceso de conversión análogo/digital y posteriormente llevada a un PC.

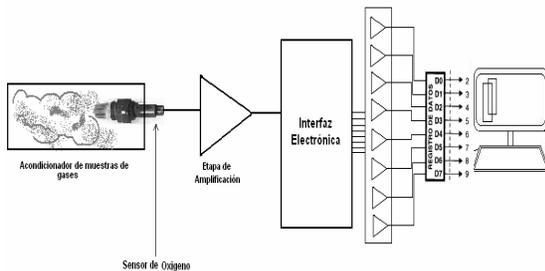


Fig. 4: Esquema general del sistema propuesto

3.1 Instrumentos asociados

UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor)
Sonda Lambda: Consta de dos sondas EGO de ZrO_2 , dispuestas de tal modo que la característica resultante es prácticamente lineal, y la respuesta bastante rápida, menor de 100 ms. Su comportamiento obedece a las leyes de Faraday y Nernst. (Jensen, B 1998)

Las siguientes ecuaciones muestran las leyes mencionadas:

$$N = i/zF \quad \text{Ec. 1. Ley Electrólisis de Faraday}$$

$$V_s = \frac{RT}{zF} \ln \frac{p_1}{p_2} \quad \text{Ec. 2. Ley de Nernst.}$$

La ecuación de Nernst da el potencial de una célula cuando la actividad de los reactivos no es la unidad.

La curva que caracteriza a la sonda EGO muestra cambios abruptos, para niveles ricos a pobre en la mezcla aire/combustible, observándose pronunciadamente vertical; esto no permite un seguimiento continuo del proceso, sino en estados definidos. La curva característica de la sonda UEGO, tiene un comportamiento que puede ser seguido en diversos momentos definidos de tiempo ya que presenta un comportamiento más lineal. (Iwata, Y 1996)

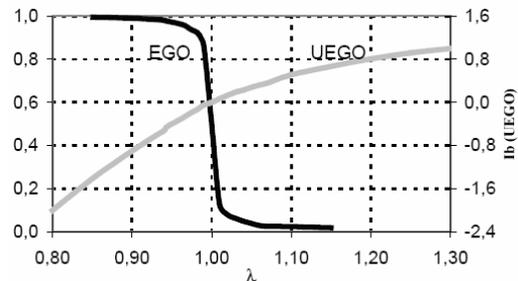


Fig. 5: Curvas características de la sonda lambda

LM9040: Amplificador de instrumentación para el sensor de oxígeno (sonda lambda) el cual permite amplificar las señales eléctricas del sensor y procesarlas a través de conversores análogos/digitales a otros sistemas (micro-procesadores, computadores entre otros...).

Conversión Análoga/digital: Se realiza con un conversor de la familia National Semiconductor con resolución de 8 bits, para ser pasar luego al puerto paralelo del computador.

Interfaz gráfica para captura de datos: Visual Basic 6.0 proporciona las herramientas para desarrollar la interfaz que muestra los valores tomados por el sensor en el acondicionador de muestras de gases para luego almacenarlos para su posterior análisis. Estos resultados se comparan con valores y patrones de fallas preestablecidos con el fin de identificar:

- 1: Fallas asociadas
- 2: Diagnóstico del motor

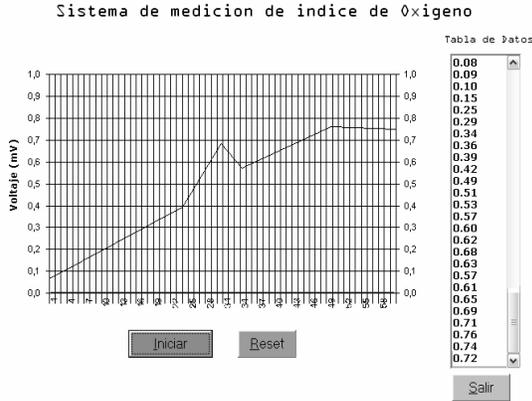


Fig. 6: Interfaz del sistema de captura de datos del PC

La figura 4 muestra el momento en que es realizada una de las mediciones en un motor diesel de un bus de servicio urbano con motor diesel de la familia CUMMINS. El comportamiento de la gráfica generada por el software muestra la correspondencia entre el valor leído del sensor (mV) y el nivel lambda teórico (relación aire/combustible). Las zonas en que los valores tienen fluctuaciones son debido a que la relación aire/combustible sufre variaciones bruscas hasta llegar a un punto de estabilidad temporal, que indica que la proporción de combustible y aire es la adecuada para el motor. Estos datos capturados son almacenados y comparados con una base de datos (ver Figura 5) donde se encuentran almacenados rangos de valores de medida del sensor (en mV) y su respectiva interpretación, la cual permite efectuar el diagnóstico del motor. La base de datos presenta un modelo relacional condicional que permite una toma de decisiones rápida, de acuerdo a los valores ingresados.

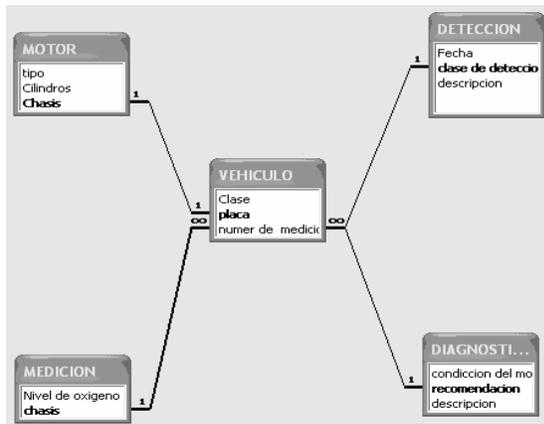


Fig. 7: Modelo relacional de la base de datos

Un tratamiento estadístico se realiza para establecer si los datos obtenidos por medición cumplen con las características teóricas, propuestas por el fabricante del sensor, mediante un paquete de tratamiento estadístico miramos la linealidad de los valores obtenidos para proseguir a la toma de decisiones. Se compara el valor medido, el valor teórico, se establece una diferencia y un porcentaje de error.

4. TOMA DE DECISIONES

La toma de decisiones se lleva a cabo teniendo en cuenta la data obtenida mediante medición, los criterios almacenados previamente en la base de datos por expertos en el tema, basados en la relación estequiométrica de la sonda (Relación Estequiométrica Ideal => $I = 1$) para los motores diesel es de 1 litro de combustible por 12.000 litros de aire. Superada esta proporción, si aumentamos la cantidad de combustible inyectado no conseguimos aumentar la potencia del motor, ya que el exceso de combustible, al no encontrar aire con el que mezclarse, forma humos y depósitos de carbonilla.

Si se aproxima a la Relación Estequiométrica Ideal, la Sonda de Oxígeno produce una brusca variación en su voltaje de salida de información. Si el voltaje de salida se encuentra en 0,2 a 0,3 volts aumentará bruscamente a 0,8 a 0,9 volts y si se encuentra a este nivel de voltaje, esa brusca variación se producirá desde ese nivel a 0,2 a 0,3 volts.

El tiempo de trepada del flanco ascendente de la señal comprendido entre 0,3 volts y 0,6 volts (condición de mezcla pobre cambiando para rica), deberá ser aproximadamente 300 milisegundos. El tiempo del flanco descendente de la señal comprendido entre 0,6 volts y 0,3 volts (condición de mezcla rica cambiando para pobre) deberá ser también de 300 milisegundos.

Teniendo en cuenta las anteriores anotaciones técnicas del sensor, la experiencia de expertos en el tema de mecánica diesel y las filosofías de detección de fallas, se crea una tabla de datos como la que se presenta a continuación, donde se describe hora de la revisión, placa del vehículo, tipo de motor (Cilindros en línea o V), valor de la medición, diagnóstico realizado, falla asociada, recomendación y observaciones.

**Tabla 1. Tabla para diagnóstico de fallas en
motores diesel propuesta**

SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN MOTORES DIESEL POR EVALUACIÓN DEL NIVEL DE O ₂ EN LOS GASES DE ESCAPE							
Fecha	Placa Vehículo	Medición realizada	Valor (mV)	Diagnóstico	Falla asociada	Recomendaciones	OBS
21/05/07	WKJ 520	Sensor O ₂	300	Relación aire/combustible relativamente pobre. Bajo nivel de combustible	Inyectores defectuosos	Revisar inyectores de combustible	Revisar y descartar válvulas
21/05/07	WKJ 5120	Sensor O ₂	320	Relación aire/combustible relativamente pobre. Bajo nivel de combustible	Inyectores defectuosos	Revisar inyectores de combustible	Revisar y descartar válvulas
21/05/07	MMM 963	Sensor O ₂	900	Relación aire/combustible relativamente rica. Nivel de combustible óptimo	No hay falla	Motor en buen funcionamiento
21/05/07	MMM 963	Sensor O ₂	860				

5. CONCLUSIONES

El sistema de detección de fallas presentado no pretende dar un diagnóstico final del motor; este presenta al técnico un primer acercamiento a posibles fallas incipientes y potenciales que pueda presentar el motor, evitando llegar a la etapa de fallas funcionales que degradan la vida útil.

El sensor usado para el desarrollo de este trabajo esta diseñado para medir la relación aire/combustible (I) en los gases de escape de vehículos. Normalmente los gases con los que trabaja son resultados de la combustión de combustibles más volátiles que el diesel. Sin embargo el comportamiento de este durante las pruebas fue satisfactorio permitiendo buenos resultados en la toma de mediciones.

Es recomendable usar el acondicionador de muestras de gases con el fin de tener una muestra gaseosa en condiciones óptimas (sin variaciones en concentración de gases).

Las fallas asociadas a los motores diesel son producto de múltiples factores. Este sistema de detección y diagnóstico de fallas por medición de gases, debe estar asociado a otros subsistemas como por ejemplo, lubricación, esfuerzos mecánicos en piezas rotativas, banco de inyectores, prueba de rodillos etc., los cuales en conjunto están en capacidad de ofrecer un diagnóstico más completo del motor.

El equipo de adquisición de datos puede ofrecer mejores resultados aumentando la resolución del conversor análogo/digital, sin embargo los resultados obtenidos con un conversor de 8 bits de resolución son buenos.

La detección y diagnóstico de fallas por medio de medición del índice de oxígeno en los gases de escape permite un acercamiento al comportamiento funcional del motor. Los gases de escape brindan mucha información sobre la dinámica del proceso de combustión que lleva a cabo el motor; por ejemplo exceso o ausencia de combustible en la cámara de combustión son reflejados en los gases de escape, así mismo como la presencia de aceite, el cual da fe de que los sistemas de lubricación tienen fallas; es posible entonces conocer muchos procesos internos del motor midiendo y analizando los componentes de los gases que salen a la atmósfera.

REFERENCIAS

- Aranguren S, Tarantino R. (2006). Métodos de Detección y Diagnóstico de Fallas en la industria. V Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada Universidad de Pamplona, Colombia.
- Bosch, (2000). Técnica de los gases de escape 1ª edición, Alemania.
- Creus, Antonio (1998). Instrumentación Industrial Prentice Hall
- Figueroa, Simón J (1997). Mantenimiento de Motores Diesel. Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Mecánica, Mérida Venezuela pp. 21-67.
- Figueroa, Simón J (1998). *Problemas de motores de combustión interna*. Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Mecánica, Mérida Venezuela.
- Giraldo, Esteban (2002). *Motores Diesel Turboalimentados en Régimen Transitorio*. Universidad de Antioquia. Escuela de Postgrados, Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas, Medellín, Colombia.
- Iwata, Y; Abe, S; Nasu, M; Aoiki, K (1996). Model Based Air-Fuel Ratio Control with Exhaust Air-Fuel Ratio Sensor & Heated Exhaust Oxygen Sensor. CSAT Czech Republic, (cap 2)
- Jensen, B; Olsen, M.B.; Poulsen, J; Vigild, C; (1998). Wideband SI Engine Lambda Control.
- Nyeby, Robert (1997). *Manual de Tecnología Diesel*. Mc Graw Hill México. Grupo Prentice Hall pp. 21-90; 256-310.
- SAE 981065. (Cap 3).
- Tarantino, R. Aranguren S. (2004). Confiabilidad en procesos de automatización Vol. N° 2, Número 4, Universidad de Pamplona, Colombia.