

Simulación computacional de las metodologías Mitzlaff y Agudelo Mejía para la selección de un diseño de dispositivo de mezclado de aire hidrogeno para motores de combustión interna de bajo costo

Jorge Leonardo Romero Peñaranda, Alvaro Jose Mendoza Pitre

Universidad Autónoma del Caribe

Barranquilla, Colombia

romeropjorge@gmail.com

almempi@hotmail.com

Abstract- Se realizó una simulación computacional en CFD de dos metodologías de diseño para dispositivos de mezclado de aire-hidrógeno, una propuesta por el investigador Klaus Von Mitzlaff y otra desarrollada por los doctores John Ramiro Agudelo Santamaría y Ricardo Mejía Álvarez, mediante esta simulación se determinó la distribución de especies aire y combustible a lo largo de un plano de corte de los dispositivos de su perfil de velocidad, presión y fracción volumétrica a lo largo de la coordenada axial de los elementos, para seleccionar el mejor diseño de dispositivo de mezclado para aire e hidrógeno para un motor de combustión interna de bajo costo.

I. INTRODUCCIÓN

Agudelo y Mejía [1] han postulado una metodología para el diseño analítico de mezcladores de aire y gas natural para motores basado en parámetros del gas natural como el índice de Wobbe y la variación de la densidad de esta sustancia con la presión y la temperatura. De otra parte, Mitzlaff [2] realizó una metodología similar pero no tuvo en cuenta la rigidez empleada por Agudelo-Mejía y decidió enfocarse en parámetros operativos del motor y el contenido de metano dentro del combustible.

Sin embargo, la decisión de dimensionar el mezclador por ambas metodologías está basada en que el diseño del mezclador que se requiere es para una mezcla de aire

hidrógeno, y hay que tener en cuenta que en una metodología se implementa mayor uso de la información suministrada por las propiedades de las sustancias para conseguir los resultados buscados y no se consideran mediciones de respuesta tales como la caída de presión en el cuello del venturi o velocidad a la salida del mismo.

Por tanto, esta investigación consiste en aplicar herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics) al dimensionamiento de mezcladores realizado por ambas metodologías, en el uso de motores de combustión interna de bajo costo, para comparar los resultados de ambas simulaciones de los dispositivos de mezclado y seleccionar el mejor diseño de mezclador de aire e hidrógeno.

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. Metodología

Esta investigación está basada en un estudio cuantitativo porque requiere calcular las dimensiones de un mezclador aire-hidrógeno por medios analíticos y posteriormente evaluar su calidad a través de herramientas computacionales.

El proyecto necesita fundamentarse en una serie de pasos lógicos con el fin de cumplir los objetivos de esta investigación. En consecuencia, se propone la realizar los siguientes pasos:

1. Caracterización del motor de combustión interna en función de parámetros técnicos.

Para caracterizar un motor, primero se debe seleccionar uno, para la presente investigación se escoge el de la motocicleta Auteco Boxer CT 100 que se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Fig. 1 Motocicleta Auteco Boxer CT 100.

Para obtener los parámetros de este motor se llevó a cabo estudios realizados en los manuales de propietario, en la ficha técnica, y en los concesionarios Auteco donde se detallan las especificaciones técnicas de esta motocicleta, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

TABLA I.

Parámetros del motor motocicleta Boxer CT 100.

Parámetros del Motor	
Disposición geométrica del motor	1 cilindro
Carrera	50,3 mm
Calibre	50 mm
Tipo de inyección	Directa
Relación de compresión	9,3 : 1
BMEP	147,5 psi

Potencia máxima	8,2 HP
Régimen de giro del motor	8000 RPM

Con estos parámetros del motor empezamos a caracterizarlo y empezamos por determinar la eficiencia volumétrica, este parámetro mide que tan eficientemente se están llenando los cilindros del motor de aire [3], para determinarlo debemos calcular la velocidad del pistón, que puede calcularse de la siguiente forma:

$$V_{mp} = \frac{2ln}{60} \quad (1)$$

Donde:

n : Revoluciones por minuto del motor.

l : Carrera del pistón.

Para después mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** determinar la eficiencia volumétrica del motor observamos que la eficiencia volumétrica que depende de la velocidad del pistón para el motor que está siendo estudiado.

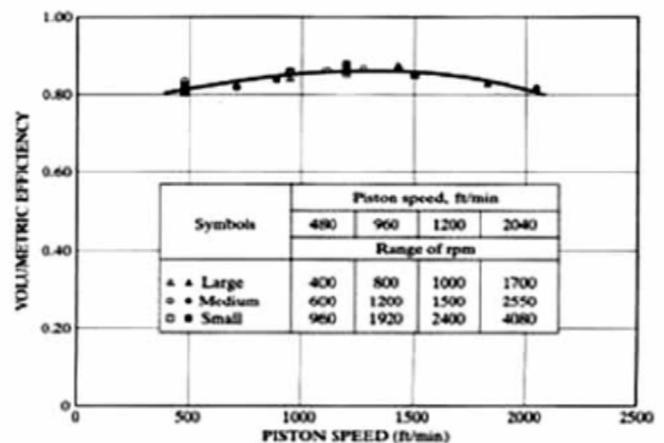


Fig. 2 Variación de la eficiencia volumétrica con la velocidad de pistón.

Donde:

n_v : Eficiencia volumétrica del motor.

Ahora se determina el flujo de aire y combustible que ingresa al motor. El flujo másico de aire que ingresa al motor puede calcularse mediante la expresión:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\rho_{aire} N V_{cd} n_v}{i} \quad (2)$$

Dónde:

\dot{m}_{aire} : Flujo másico de aire que ingresa al motor.

ρ_{aire} : Densidad de aire.

N : Régimen de giro del motor.

V_{cd} : Cilindrada del motor.

La cilindrada del motor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$V_{\text{cd}} = \frac{\pi}{4} B^2 l \quad (3)$$

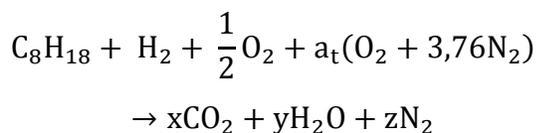
Donde:

B : Calibre del pistón.

l : Carrera del pistón.

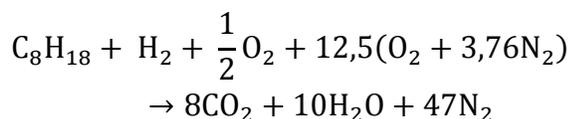
Después de obtener el flujo másico de aire, se establece la relación estequiométrica aire/combustible, que gobierna la combustión completa entre el Hidrógeno, oxígeno, gasolina y el aire.

En esta investigación se trabaja la gasolina como octano C_8H_{18} , el combustible alternativo HHO como $H_2 + \frac{1}{2}O_2$ y el aire como $a_t(O_2 + 3,76N_2)$, y para plantear la siguiente reacción química:



En la reacción anterior se supone, debido a la falta de información experimental, una relación de alimentación de 1 mol de C_8H_{18} por mol de HHO ($H_2 + \frac{1}{2}O_2$). Para determinar los coeficientes desconocidos de la ecuación anterior [a_t, x, y, z].

La reacción queda de la siguiente manera:



Partiendo de esta reacción química se calcula la relación de aire combustible estequiométrica:

$$AC = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{\dot{m}_{\text{combustible}}} = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{\dot{m}_{C_8H_{18}} + \dot{m}_{HHO}} \quad (4)$$

Para calcular el flujo másico $\dot{m}_{C_8H_{18}}$ se implementa la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \rightarrow \dot{m} = \rho \dot{V} \quad (5)$$

Y para determinar el flujo másico \dot{m}_{HHO} se implementa la expresión:

$$\dot{m}_{HHO} = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{AC} - \dot{m}_{C_8H_{18}} \quad (6)$$

2. Diseño de dispositivos de mezclados.

- Diseño del mezclador metodología Mitzlaff.

El ingeniero Klaus Von Mitzlaff desarrollo una metodología en la cual expone las siguientes consideraciones:

Para un alto flujo volumétrico de aire.

- La velocidad del aire es alta.
- La presión del aire es baja en la sección del venturi.
- La diferencia de presión entre el gas combustible y la corriente de aire es alta.
- Gran parte del gas combustible fluye a través de las aberturas del mezclador junto con la corriente de aire.

Para un bajo flujo volumétrico de aire.

- La velocidad del aire es baja.
- La presión del aire es alta en la sección del venturi.
- La diferencia de presión entre el gas combustible y la corriente de aire es baja.
- Una pequeña parte del gas combustible fluye a través de las aberturas del mezclador junto con la corriente de aire.

El flujo volumétrico del aire de entrada al motor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{\text{aire}} = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire}}} \quad (7)$$

La velocidad superficial media del aire en el ducto de admisión se determina a través de la siguiente fórmula:

$$V_{\text{media el aire}} = \frac{\dot{V}_{\text{aire}}}{A_i} \quad (8)$$

A_i : Donde A_i representa el área transversal del ducto de admisión, cuyo diámetro fue medido en campo.

$$A_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 \quad (9)$$

d_i : Diámetro de entrada de la mezcla de aire gasolina en la admisión medida en campo 21 mm.

El área de la garganta del venturi A_T se determina empleando la ecuación de continuidad y teniendo en cuenta que la contracción del aire causara que la velocidad aumente, pero dicha velocidad no debe exceder los 150 m/s debido a que se asume que el aire se mantiene como flujo incompresible, es decir $M_a < 0,3$.

Entonces siguiendo con la metodología de diseño se obtiene A_T , mediante la ecuación:

$$A_T \geq \frac{V_{\text{mediadelaire}}}{150 \text{ m/s}} A_i \quad (10)$$

El área final de la sección de descarga se determina a través de la ecuación de flujo volumétrico para un área dada, hay que tener en cuenta que esta podría ser muy pequeña debido a las condiciones de elevada potencia y velocidad.

Debido a esto se puede especificar un rango de operación posible. El máximo valor no debe exceder 1/10 del área de la sección de entrada, ni ser inferior a la mínima para una velocidad de 2 m/s.

$$\frac{A_i}{10} \geq A_d \geq \frac{\dot{V}_{\text{HHO}}}{V_{\text{media del HHO}}} \quad (11)$$

- Diseño del mezclador metodología Agudelo - Mejía.

Agudelo y Mejía desarrollaron un modelo matemático para el diseño de mezcladores. Utilizaron las mismas suposiciones de flujo que Mitzlaff, pero esta vez consideran la variación de la densidad con la presión y la temperatura, lo que lo hace más complejo. El proceso de expansión del aire y del gas se ha considerado adiabático.

Según el esquema del mezclador, la presión en la garganta del mezclador será escogida por el diseñador según el tipo de aspiración natural del motor (natural o turboalimentado).

Esta presión ha de ser menor que la del gas (aire o combustible) que se encuentra a menor presión. Se puede asumir $P_T = xP_i$ ó $P_T = xP_d$, donde $0 < x < 1$, siendo x escogido a criterio del diseñador para asegurar el flujo desde las secciones A_i y A_d hacia A_T .

Con estas consideraciones planteadas por Agudelo y Mejía se llega a la siguiente expresión para calcular el área de la garganta del venturi:

$$A_T = \frac{\dot{m}_a}{\sqrt{2 \cdot \bar{\rho}_a}} \cdot \frac{AC \cdot \left(\frac{P_{C_i}}{W}\right) + 1}{AC \cdot \left(\frac{P_{C_i}}{W}\right)} \cdot \left[P_i - P_T + \frac{1}{2 \cdot \bar{\rho}_a} \cdot \left(\frac{\dot{m}_a}{A_i}\right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Donde se requiere calcular la densidad promedio del aire en el flujo desde la sección de entrada hasta la garganta mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{\rho}_a = \frac{\rho_{a,i}}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{P_T}{P_i}\right)^{\frac{1}{k_a}} \right] \quad (13)$$

Para calcular el área de descarga mediante esta metodología se implementa la ecuación:

$$A_d = \frac{\dot{m}_f}{\sqrt{2 \cdot \bar{\rho}_f}} \cdot \left[P_d - P_T + \frac{1}{2 \cdot \bar{\rho}_f} \cdot \left(\frac{\dot{m}_f}{A_{f,t}}\right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

En la cual se entiende que se necesita obtener el valor de la densidad promedio del hidrogeno pueda expresarse como:

$$\bar{\rho}_f = \frac{\rho_{f,d}}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{P_T}{P_d} \right)^{\frac{1}{k_f}} \right] \quad (15)$$

Y también se requiere el área de flujo para el gas en la garganta [m²] que se expresa de esta manera:

$$A_{f,T} = A_T \cdot \frac{1}{AC \cdot \left(\frac{PC_i}{W} \right) + 1} \quad (16)$$

TABLA II.

Dimensiones del mezclador calculadas por los métodos Mitzlaff y Agudelo-Mejía.

Metodologías	A _T	d _T	A _d	d _a
Mitzlaff	3,643*10 ⁻⁵ m ²	6,81 mm	3,463*10 ⁻⁵ m ²	2,34 mm
Agudelo Mejía	4,681*10 ⁻⁵ m ²	7,72 mm	2,557*10 ⁻⁷ m ²	0,201 mm

Después de calcular las dimensiones de la zona de descarga, y la garganta del dispositivo de mezclado mediante ambas metodologías para el diseño del mezclador se puede establecer que el método de Agudelo-Mejía es el más conservador y se obtienen valores de dimensionamiento un poco mayor en la garganta y menor en la zona de descarga atribuido a que considera las variaciones en la densidad que tienes el gas con respecto a la presión y temperatura, además tiene en cuenta el índice de Wobbe, lo cual hace al diseño más real. Al emplearse la metodología Mitzlaff se observa que se requiere una sección transversal en la garganta menor a fin de poder mantener las condiciones de flujo incompresible.

3. Definición de condiciones de frontera.

Para realizar la simulación del proceso de mezclado debemos definir algunas condiciones de frontera para las cuales requerimos calcular algunos parámetros de los flujos que transitan por el sistema que es objeto de estudio.

Para determinar las fracciones volumétricas de la corriente 1 en la entrada del mezclador por el cual ingresa aire y gasolina en la zona de admisión mediante la ecuación:

$$X_{\text{aire}} = \frac{\dot{V}_{\text{aire}}}{\dot{V}_{\text{aire}} + \dot{V}_{\text{C}_8\text{H}_{18}}} \quad (17)$$

Para determinar las fracciones máscas de hidrogeno y oxígeno en el combustible HHO en la corriente de la zona de descarga del flujo másico \dot{m}_2 mediante la ecuación:

$$X_{\text{H}_2} = \frac{\dot{V}_{\text{H}_2}}{\dot{V}_{\text{H}_2} + \dot{V}_{\text{O}_2}} \quad (18)$$

Como ya sabemos que tenemos dos flujos másicos de entrada hay que determinar la velocidad de cada uno de ellos en la entrada al dispositivo de mezclado, para la primera mezcla de aire gasolina tenemos que la velocidad calculada según la ecuación:

$$V_{\text{aire} - \text{C}_8\text{H}_{18}} = \frac{\dot{V}_{\text{aire} - \text{C}_8\text{H}_{18}}}{A_i} \quad (19)$$

Para la cual requerimos calcular el flujo volumétrico de aire y gasolina utilizando esta expresión:

$$\dot{V}_{\text{aire} - \text{C}_8\text{H}_{18}} = \dot{V}_{\text{aire}} + \dot{V}_{\text{C}_8\text{H}_{18}} \quad (20)$$

Para calcular la velocidad de la mezcla de hidrogeno y oxígeno en la zona de descarga de HHO, se determinan otros parámetros, como el flujo volumétrico de HHO, que se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$\dot{V}_{\text{HHO}} = \dot{V}_{\text{H}_2} + \dot{V}_{\text{O}_2} \quad (21)$$

La presión en la zona de descarga se halla teniendo en cuenta que el gas combustible HHO proviene de un electrolizador atmosférico para el cual se obtuvo mediante la ecuación:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \rightarrow P_2 = \Delta P + P_1 \quad (21)$$

Esta caída de presión se obtiene del recorrido que realiza el combustible alternativo en el generador de HHO hasta la zona de descarga del mezclador. El valor de ΔP usado en este trabajo proviene de los cálculos teóricos de Carpintero [4].

Para calcular la presión en el área de la garganta del mezclador que será nuestra presión relativa en nuestra simulación aplicamos la ecuación de Bernoulli entre dos puntos el primero será el área de entrada del múltiple de admisión y el segundo será el área de la garganta del venturi, para este proceso de mezclado se consideró que no habrá pérdidas por fricción y que los flujos de la mezcla de deslizan libremente sobre las paredes del mezclador.

$$P_2 = \gamma \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (22)$$

4. Modelo Matemático.

La unidad mezcladora de aire-hidrógeno necesita ser representada por medio de un modelo matemático que describa los fenómenos físicos que ocurren dentro de la región de estudio. Esta descripción matemática del mezclado de los gases se basa exclusivamente en las ecuaciones de Navier- Stokes para flujo de fluidos Isotérmicos en estado estable, dado que se simulara los dos diseños en condiciones de operación sin variación temporal; con conservación de las moles de las especies analizadas, analizando este proceso como adiabático; es decir, sin transferencia de calor entre este sistema y los alrededores.

Al tener en cuenta las consideraciones para simplificar este modelo, no es posible ignorar las implicaciones de los gradientes de concentración de las especies sobre el flujo de los fluidos aire e hidrógeno dentro del dominio computacional. Esto sugiere que el término de difusión correspondiente a la presión debe incluirse ya que tiene un gran efecto según las condiciones de flujo estudiado y no puede ignorarse. Por lo cual, se tendrá en cuenta las fuentes de generación para la ecuación de conservación de masa.

La ecuación de la conservación de la masa para este fenómeno de mezclado de los gases queda expresada según Bird [5], de la siguiente forma:

Para el aire:

$$\begin{aligned} (\nabla * \rho_{\text{Aire}} \mathbf{u}) &= (\nabla * \rho_A D_{\text{Aire-Gasolina}} \nabla w_{\text{Aire}}) \\ &+ \frac{M_{\text{Aire}} X_A}{RT} \left(\frac{\overline{v_{\text{Aire}}}}{M_{\text{Aire}}} - \frac{1}{\rho} \right) \nabla P \\ (\nabla * \rho_{\text{Aire}} \mathbf{u}) &= (\nabla * \rho_A D_{\text{Aire-HHO}} \nabla w_{\text{Aire}}) \\ &+ \frac{M_{\text{Aire}} X_A}{RT} \left(\frac{\overline{v_{\text{Aire}}}}{M_{\text{Aire}}} - \frac{1}{\rho} \right) \nabla P \end{aligned}$$

Para la especie gasolina:

$$\begin{aligned} (\nabla * \rho_{\text{Gasolina}} \mathbf{u}) &= (\nabla * \rho_A D_{\text{Aire-Gasolina}} \nabla w_{\text{Aire}}) \\ &+ \frac{M_{\text{Gasolina}} X_A}{RT} \left(\frac{\overline{v_{\text{Gasolina}}}}{M_{\text{Gasolina}}} - \frac{1}{\rho} \right) \nabla P \end{aligned}$$

Para la especie HHO:

$$\begin{aligned} (\nabla * \rho_{\text{HHO}} \mathbf{u}) &= (\nabla * \rho_A D_{\text{Aire-HHO}} \nabla w_{\text{Aire}}) \\ &+ \frac{M_{\text{HHO}} X_A}{RT} \left(\frac{\overline{v_{\text{HHO}}}}{M_{\text{HHO}}} - \frac{1}{\rho} \right) \nabla P \end{aligned}$$

Asimismo, se asume que en el proceso de mezclado de aire y HHO dentro de motores de combustión interna de bajo costo solo existe fricción entre las paredes sólidas y el fluido.

Como es de esperarse, el flujo se da en la dirección donde la presión disminuye y esto se debe indicar en la expresión de la conservación de la cantidad de movimiento. Por tanto, la ecuación se expresa como:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i$$

Según estudios hechos por Winterbone [6] el término difusivo referente a los esfuerzos cortantes para la ecuación de conservación del momento no es influenciado por el mecanismo viscoso de tipo molecular porque los efectos de las fuerzas viscosas son despreciables ($8 \times 10^{-6}\%$ de otros términos). Así la expresión para el componente difusivo queda:

$$\tau_{ij} = - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}$$

Otra suposición valida es que el flujo se encuentra analizado bajo régimen turbulento y así, las ecuaciones deberán apoyarse en otros modelos matemáticos para describir la fenomenología del mezclado de los gases. Teniendo en cuenta que se desprecian los efectos de flotación; que el fluido se considera incompresible porque según las metodologías de diseño evaluadas, la velocidad no excede los 150 m/s (es decir $M < 0.3$); y sin ninguna consideración de variación temporal, el modelo de la conservación de la energía cinética turbulenta y el modelo de disipación de la energía cinética se simplifica a:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho k u_j - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t(P) - \rho \varepsilon - \mu_t P_{NL}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \partial u_j - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ = -C_{\varepsilon 2} P \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 1} P \frac{\varepsilon}{k} - \mu_t P_{NL} \end{aligned}$$

Para la conservación de las especies, se reconoce que no hay reacciones químicas y que el movimiento de fluidos no se debe a gradientes de temperatura. Además, se sostiene que el término difusivo se encuentra gobernado por fenómenos asociados a la turbulencia. La ecuación para cada especie resultante es:

Para la gasolina:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j y_{Gasolina} + F_{Gasolina,j}) = 0$$

La componente difusiva resulta:

$$F_{Gasolina,j} = \alpha \overline{\rho u'_j Y_{Gasolina}}$$

Para el HHO:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j y_{HHO} + F_{HHO,j}) = 0$$

Su expresión difusiva es:

$$F_{Gasolina,j} = \alpha \overline{\rho u'_j Y_{HHO}}$$

Para el aire:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j y_{aire} + F_{aire,j}) = 0$$

El término difusivo comprende:

$$F_{aire,j} = \alpha \overline{\rho u'_j Y_{aire}}$$

4. Simulación Computacional

Esta sección muestra los pasos a seguir y los parámetros implementados, para obtener la simulación en CFD del diseño de dos mezcladores de aire-hidrógeno bajo las metodologías Agudelo Mejía y Mitzlaff, para poder seleccionar el mejor dispositivo de mezclado, ya que el mejor proceso para la obtención de la mezcla impacta

significativamente en el ahorro de combustible del motor de este vehículo destinado para actividades mototaxistas en Sincelejo Sucre.

Para analizar el sistema que es objeto de estudio se implementa el software ANSYS 13.0, se utilizará el paquete de herramientas Fluid Flow (CFX), ahora se procede a definir y configurar los parámetros en el software para realizar la simulación computacional.

Antes de comenzar con el proceso de simulación se debe tener en cuenta algunas consideraciones propias para cumplir con el objetivo, primero se debe establecer que el flujo se encuentra en régimen estacionario ya que las propiedades del flujo multicomponente dentro del mezclador no varían en el tiempo, otra consideración a tener en cuenta es que los fluidos llegan desarrollados a las entradas del sistema.

- Geometría.

En este paso se introduce la geometría del sistema que en este caso es la del fluido de la mezcla que adopta el cuerpo del mezclador en su interior, para el cual se requiere los CAD's de los dispositivos de mezclado elaborados en Solidwork 2011 según las cotas obtenidas mediante las metodologías.

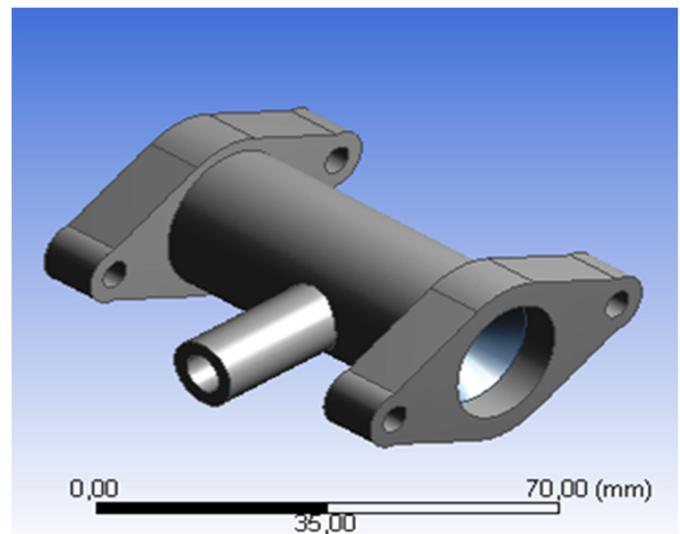


Fig. 3 CAD ingresado a la herramienta computacional.

Después de ingresar los CAD's se realizan modificaciones en la geometría inicial para que quede solamente la geometría del fluido dentro del mezclador, y el resultado final se aprecia en las siguientes figuras para las dos metodologías.

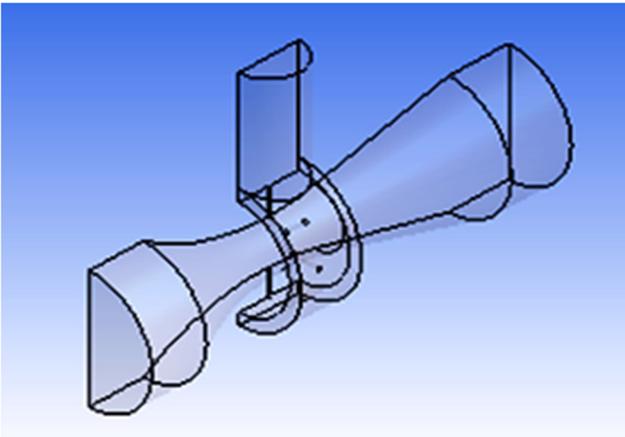


Fig. 4 Geometría del sistema Metodología Agudelo-Mejía.

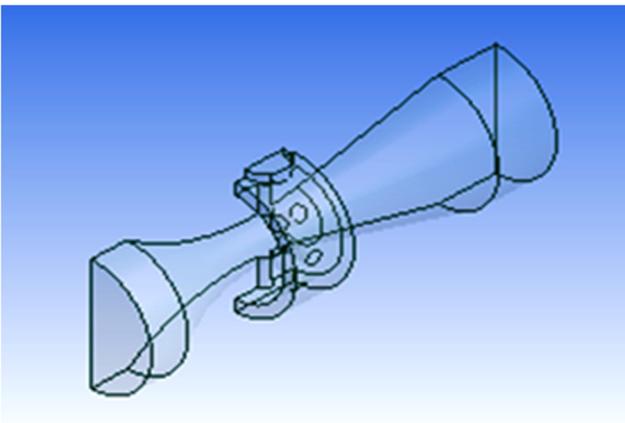


Fig. 5 Geometría del sistema Metodología Mitzlaff.

- Mallado.

En estas primeras etapas de la simulación se puede observar que las principales tareas que determinaran los resultados de simulación satisfactorios son la especificación de la geometría del dominio y el diseño del mallado. Estos dos aspectos que caracterizan tal resultado son la convergencia y la independencia de malla.

Los problemas relacionados con la convergencia son dependientes de la física del problema y del método numérico, mas sin embargo, el número de celdas o elementos del diseño del mallado gobierna la precisión de la solución, debido a que la solución del problema de flujo (velocidad, presión, fracción volumétrica.) es definida en los nodos dentro de cada elemento. No hay forma de estimar los errores introducidos por el diseño inadecuado de mallado para un flujo general, la única manera de eliminar los errores debido a la rugosidad del mallado es desarrollar un estudio de independencia de malla, el

cual es un procedimiento de refinamiento sucesivo de una malla inicialmente gruesa hasta que cierto valor clave no cambia. En general, cuanto mayor es el número de celdas en el mallado, mejor será la precisión de la solución. Tanto la exactitud de una solución y su costo en términos de hardware del equipo necesario y el tiempo de cálculo dependen de la finura de la malla [7].

Debido a que el tiempo de cálculo de la simulación no es relevante en esta investigación, se llevó a cabo el mallado para ambas geometrías con el máximo número de celdas o elementos que fueron posibles de generar por ANSYS 13. Para determinar el tamaño del elemento con que se realizaron los mallados se toma como referencia la geometría más compleja que es la del mezclador diseñado mediante la metodología de Agudelo-Mejía ya que en este diseño los agujeros por los cuales se distribuye uniformemente el hidrógeno son de menor diámetro y los conductos son más angostos, para este diseño se usó una malla con 353253 elementos tetraedros y 70830 nodos., mientras que para la geometría del mezclador determinada a partir de la metodología de Mitzlaff se implementó una malla con 545693 número de elementos y con 112003 numero de nodos, la manera en la cual se verifica de que este número de elementos y nodos es el adecuado, fue generar diferentes mallas para un rango de diferentes tamaños de elementos, teniendo en cuenta el límite máximo de numero de elementos que el software permite implementar, para el tipo de licencia con el cual cuenta, después de encontrar un tamaño de elemento adecuado que el software no rechace y se realiza múltiples simulación es para verificar que los resultados no varíen significativamente con respecto a la variación de numero de elementos y nodos , y al no observar en los parámetros y condiciones de frontera cambios que alteren el proceso de mezclado se aceptan estos datos a partir del menor tamaño de elemento implementado para el mallado.

Después de haber deducido el número de elementos y nodos generamos el mallado para ambas metodologías como se observan en las figuras 6 y 7.

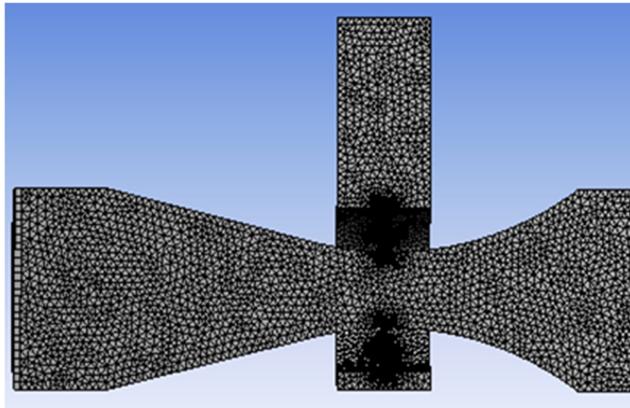


Fig. 6 Malla Metodología Agudelo-Mejía.

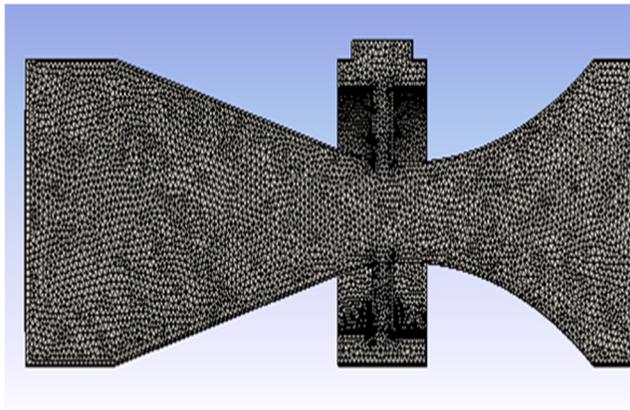


Fig. 7 Malla Metodología Mitzlaff.

- Condiciones de frontera ingresadas a la herramienta computacional.

En esta sección se plasman los parámetros y las condiciones de frontera que gobiernan el sistema, el modelo matemático que muestra el fenómeno de mezclado, las propiedades de los fluidos que componen la mezcla en cada entrada y en la salida del dispositivo de mezclado, y que serán ingresadas al software para realizar la simulación, también se definen las salidas, las entradas, las paredes y la zona de simetría de las mallas generadas para cada metodología.

Como se aprecia en la Tabla 3, a parte de estos parámetros ingresados a la herramienta computacional hay que definir la convergencia de las variables a controlar e la simulación para este caso las fracciones volumétricas de los compuestos de las mezclas que resolverán las ecuaciones que representan este fenómeno cuando haya una convergencia en 1×10^4 segundos y se

programaran unas 10000 iteraciones para que el software realice la simulación.

TABLA III.
Parámetros ingresados al software

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Presión de Entrada del HHO	Pe	Pa	102426.9
Fracción Volumétrica Hidrógeno	%H ₂	%	66
Fracción Volumétrica Oxígeno	%O ₂	%	34
Fracción Volumétrica Aire	%Aire	%	99
Fracción Volumétrica Gasolina	%Gasolina	%	1
Flujo másico a la salida del mezclador	m ³ Salida	Kg/s	0.00685266
Temperatura de la mezcla	Tm	°C	30

III. RESULTADOS

En este apartado se detallan los resultados entre los dispositivos de mezclado de aire hidrogeno diseñados bajo dos metodologías diferentes. Se comparan las siguientes propiedades de la mezcla para el aire y el hidrogeno como son las fracciones volumétricas, las velocidades, las presiones, todo esto con el fin de seleccionar la mejor metodología de diseño.

Una de las variables que vamos a comparar mediante los resultados de la simulación es la presión en las diferentes zonas del mezclador, para esto se genera un plano ZY en el software que permita observar el comportamiento del fluido dentro del mezclador y sus variaciones de presión como se aprecia en la Figura 8 y la Figura 9, para cada una de las metodologías.

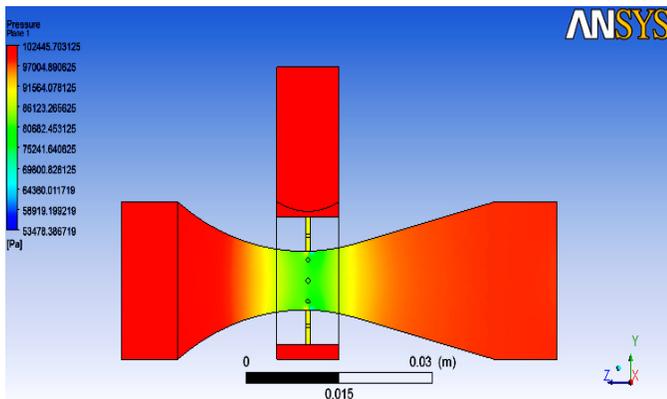


Fig. 8 Presión en las diferentes zonas del mezclador (Agudelo-Mejía).

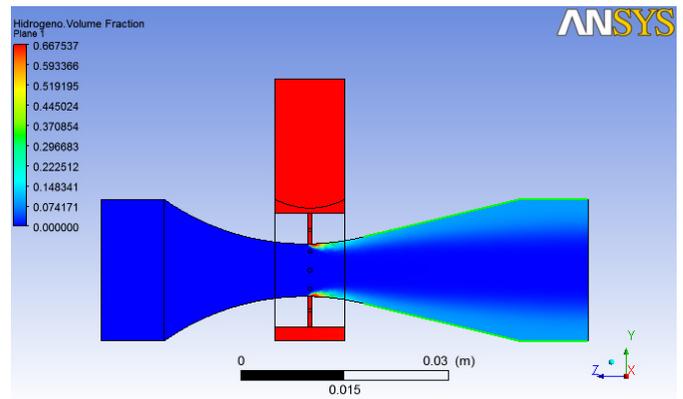


Fig. 10 Fracción volumétrica de hidrogeno en las diferentes zonas del mezclador (Agudelo-Mejía).

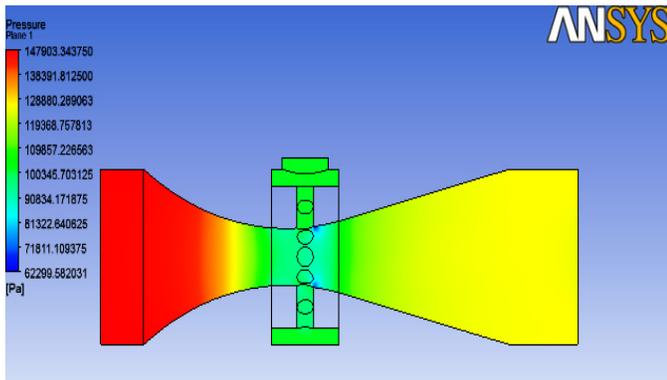


Fig. 9 Presión en las diferentes zonas del mezclador (Mitzlaff).

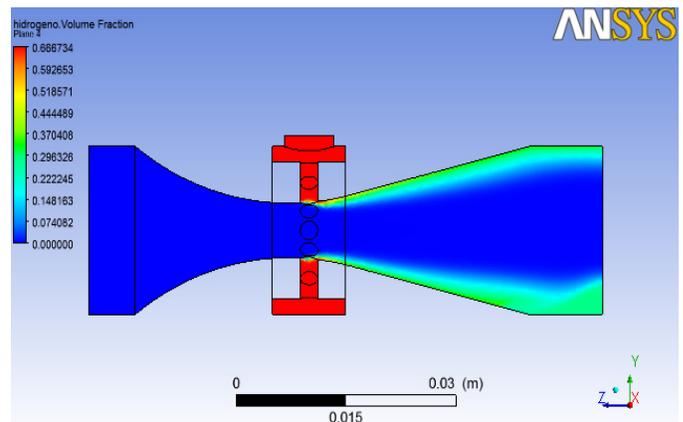


Fig. 11 Fracción volumétrica de hidrogeno en las diferentes zonas del mezclador (Mitzlaff).

En la metodología Agudelo Mejía se aprecia a lo largo del dispositivo de mezclado para cada zona del mezclador valores normales de presión, para este proceso como se detalla en la figura la distribución de las presiones en la escala de color, mientras que en la metodología de Mitzlaff se observan valores para la presión muy diferentes para cada zona del mezclador.

Al igual que con la presión generamos otro plano en el que se aprecie las fracciones volumétricas de Hidrogeno en las diferentes zonas del mezclador, para ambas metodologías como se aprecian en la Figuras 10 y la Figura 11, de las cuales podemos deducir que en el dispositivo de mezclado dimensionado bajo la metodología Agudelo Mejía hay menor variación de las fracciones volumétricas de hidrogeno desde la garganta hasta la salida del mezclador.

Además se va a detallar las velocidades para el aire dentro de los dos dispositivos de mezclado como se observa en la Figuras 12 y la Figura 13, en las cuales se observa uniformidad y menor variación para la metodología de Agudelo Mejía.

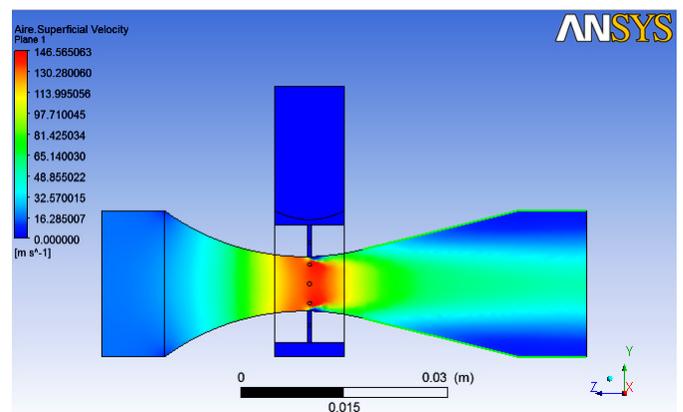


Fig. 12 Velocidad del aire en las diferentes zonas del mezclador (Agudelo-Mejía).

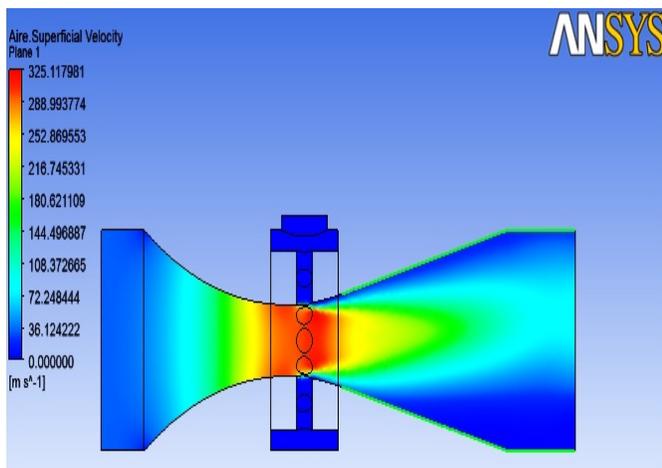


Fig. 13 Velocidad del aire en las diferentes zonas del mezclador (Mitzlaff).

Todos estos datos de las variables, obtenidos como resultado de la simulación realizada para cada metodología, se comparan en la zona de la garganta que es donde se lleva a cabo el proceso de mezclado hasta la salida del mezclador.

IV. CONCLUSIONES

Se han dimensionado dos dispositivos de mezclado de aire-hidrógeno, basándose en las metodologías Mitzlaff y Agudelo Mejía, para obtener la geometría del dominio que determina un factor importante para realizar la simulación del flujo multicomponente dentro del mezclador, la mejor metodología para el dimensionamiento del dispositivo de mezclado es la de Agudelo-Mejía este proceso de mezclado, porque después de simular el comportamiento de los fluidos dentro del mezclador se observa que hay una mejor distribución de los componentes de la mezcla desde la garganta hasta la salida del mezclador manteniendo parámetros normales de presión, velocidad y fracción volumétrica.

La descripción o modelo matemático del mezclado de gases se basó en las ecuaciones de Navier-Stokes formuladas para este fenómeno para flujo de fluidos isotérmicos en estado estable, con conservación de las moles de las especies analizadas y sin la existencia de transferencia de calor entre el sistema y los alrededores.

El software implementado para la simulación fue ANSYS 13.0, en el cual se definieron los parámetros y condiciones de frontera del sistema del flujo multicomponente dentro del mezclador, al haber

obtenido la geometría del dominio y la independencia de malla, la simulación nos da como resultado las variables a comparar en la salida del mezclador que nos sirven como referencia para seleccionar el mejor diseño de dispositivo de mezclado.

El flujo multi-componente de aire-hidrógeno en un mezclador dimensionado bajo la metodología Agudelo Mejía, se comporta de mejor forma respecto al diseño realizado por la metodología Mitzlaff. Para zonas del anillo separador y el cono difusor del mezclador Mitzlaff, el hidrógeno se difunde en el aire en mayor proporción respecto a la metodología Agudelo-Mejía. Sin embargo, esta última propuesta genera una mayor dilución del aire en cercanías a las entradas radiales de la garganta en el mezclador.

La presión de entrada en el mezclador Agudelo-Mejía es menor respecto a la entrada de la tobera del Venturi propuesto por Mitzlaff. Esta implicación podría explicar por qué la presión en la garganta del Venturi Agudelo es menor respecto al diseño de Mitzlaff, como consecuencia práctica en el desempeño del motor se obtiene un mejor rendimiento, menor consumo de gasolina y por ende menos emisiones de CO₂ a la atmosfera y menos contaminación al medio ambiente.

Tal como lo se puede apreciar en los diseños, el diámetro de la garganta del venturi en la metodología Agudelo es mayor que el deducido por el método Mitzlaff.

Según los resultados del análisis computacional, ambas velocidades más altas alcanzan valores cercanos a los 8 m/s para la metodología Agudelo-Mejía y velocidades de 12 m/s a 40 m/s para la metodología Mitzlaff.

Las fracción volumétrica de Hidrogeno en la salida del mezclador para el diseño de la metodología Mitzlaff llega a 55% logrando así una mejor distribución de combustible gaseoso de HHO en la mezcla.

REFERENCIAS

- [1]Agudelo J, Mejía R. “Desarrollo de un Modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores”. En: Revista Facultad Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Presentado para publicación 2001.
- [2]Mitzlaff Klaus Von. Engines for Biogas, Theory, Modification, Economy, Operation. Ed. Gate. P. 59-69.1988.

[3] PULKRABEK. Willard. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. 2ed. New Jersey: Pearson Education. 2004. 478p. ISBN 0131405705.

[4] Carpintero J. Evaluación del impacto de la producción de HHO proveniente de un electrolizador optimizado por medio de la metodología de superficies de respuesta, sobre el ahorro de combustible de un motor de combustión interna de una motocicleta de bajo costo empleado por la comunidad moto taxista del municipio de Sincelejo-Sucre. Universidad Autónoma del Caribe. 2013.

[5] BIRD, ROBERT. Fenómenos de transporte. Segunda edición. Limusa Wiley, 2006. ISBN: 968-1 8-6365-8.

[6] Winterbone .D, Pearson, R. Theory of Engine Manifold Design.Wave Action Method for IC Engines.Professional Engineering Publishing 2000.

[7] Versteeg H., Malalasekera W. AN INTRODUCTION TO COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. Pearson: England, 2007.