

ANÁLISIS DE CFD SOBRE LA VELOCIDAD DE ENTRADA, TEMPERATURA Y CAÍDA DE PRESIÓN EN DUCTOS DE AIRE ACONDICIONADO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

CFD ANALYSIS ON INPUT VELOCITY, TEMPERATURE AND PRESSURE DROP IN ELECTRIC VEHICLE AIR CONDITIONING DUCTS

Romero-Nava S.A.¹, Drury-Zamora J.G.^{2*}

¹CIATEQ, A. C., Centro de Tecnología Avanzada

² Posgrado CIATEQ, A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Calle San Agustín del Retablo 150, Colonia Constituyentes Fovisste CP 76150, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

*alromna24@gmail.com.

Artículo Científico

Publicado: 30 abril 2024

RESUMEN

La variación de temperatura y velocidad del flujo de aire a lo largo de la trayectoria de un ducto obedece en cierta medida a fenómenos de transporte. Para el caso particular de los ductos de aire acondicionado en vehículos eléctricos, es prioritario lidiar con el análisis de dinámica fluidos, transferencia de calor, así como las implicaciones derivadas de la existencia de diferentes arquitecturas vehiculares, y principalmente por la distribución de componentes en la cabina y panel de instrumentos. Todo ello conlleva a realizar cambios geométricos en los ductos, los cuales son: sección transversal, radio de aspecto y claros hacia componentes adyacentes. Si se toma en cuenta que a lo largo de las etapas de desarrollo se van a originar cambios que involucren en cierta medida modificaciones a los ductos, es conveniente realizar periódicamente una reevaluación de los objetivos predefinidos en cuanto a la eficiencia del aire

acondicionado se trate. De esta manera se develan las divergencias entre los parámetros establecidos al inicio del desarrollo y los efectos colaterales de la integración vehicular. Para el presente caso de estudio, se realizó un análisis de CFD (Computational Fluids and Dynamics) con la ayuda del software ANSYS Fluent R2023 versión estudiantil, mediante el cual se busca identificar los factores que mayor incidencia tienen en la variación de velocidad, caída de presión y temperatura a la salida del ducto, como parte de las condiciones iniciales del experimento, se variaron las velocidades del flujo de aire a la entrada del ducto con los siguientes valores: 1.2, 1, 0.8 y 0.6 m/s, así como el tamaño de la malla: 0.1, 0.05, 0.03 y 0.005 m. De acuerdo con el análisis de ANOVA de un diseño de bloques al azar, el objetivo radica en estudiar si el impacto que tienen los parámetros de entrada sobre las variables es significativo. Finalmente, los efectos energéticos a nivel de integración

vehicular repercuten en la autonomía del vehículo, de esta manera se pone de manifiesto la inquietud del cliente a la hora de discernir sobre la adquisición de un vehículo eléctrico.

Palabras clave: CFD; Confort; Dinámica de fluidos; Flujo de aire; Transferencia de calor.

ABSTRACT

The variation in temperature and velocity of the airflow along the path of a pipeline is due to some extent to transport phenomena. For the particular case of air conditioning ducts in electric vehicles, it is a priority to deal with the analysis of fluid dynamics, heat transfer, as well as the implications derived from the existence of different vehicle architectures, and mainly by the distribution of components in the cabin and instrument panel. All of this leads to geometric changes in the ducts, which are: cross-section, aspect radius, and clearances to adjacent components. If it is taken into account that throughout the development stages there will be changes that involve to some extent modifications to the pipelines. It is advisable to carry out a periodic re-evaluation of the predefined objectives in terms of the efficiency of the air conditioner. In this way, the divergences between the parameters established at the beginning of development and the collateral effects of vehicular integration are revealed. For this case study, a CFD (Computational Fluids and Dynamics) analysis was carried out with the help of the ANSYS Fluent R2023 student version software, through which it is sought to identify the factors that have

the greatest impact on the variation of speed, pressure drop and temperature at the outlet of the pipeline, as part of the initial conditions of the experiment, The velocities of the airflow at the duct inlet were varied with the following values: 1.2, 1, 0.8 and 0.6 m/s, as well as the mesh size: 0.1, 0.05, 0.03 and 0.005 m. According to ANOVA's analysis of a randomized block design, the goal is to study whether the impact of input parameters on variables is significant. Finally, the energy effects at the level of vehicle integration have an impact on the vehicle's autonomy, thus highlighting the customer's concern when discerning the acquisition of an electric vehicle.

Keywords: CFDs; Comfort; Fluid dynamics; Airflow; Heat transfer.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay dos modalidades vehiculares que no dependen de la combustión interna, los cuales son: BEV's (Battery Electric Vehicle) y PHEV's (Plug-in Hybrid Electric Cars). Los PHEV's funcionan a base de la combinación de dos fuentes de poder: batería y gasolina, mientras que para el caso de los BEV's se reemplazan los componentes que utilizan gasolina por el uso de baterías con una prolongada autonomía [1].

De acuerdo con un estudio de Bloomberg, en el año 2022 las ventas de automóviles eléctricos representaron el 14% del total de vehículos nuevos vendidos, rebasando los 10 millones de unidades vendidas para 2022 [2].

Actualmente con el acelerado desarrollo de la electrificación automotriz, los

vehículos eléctricos se han vuelto más eficientes, y, por lo tanto, la importancia de una adecuada gestión energética [3].

La Agencia Internacional de Energía ha revelado que un vehículo EV (Electrical Vehicle) consume alrededor de un 49% menos de energía que un ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle) y además con nulas emisiones de gases de combustión durante la operación vehicular [4].

Como puede observarse en la **Figura 1**, el sistema de aire acondicionado vehicular es un alto consumidor energético, el sistema de HVAC consume alrededor de 23.7% de energía total disponible para un EV [5].

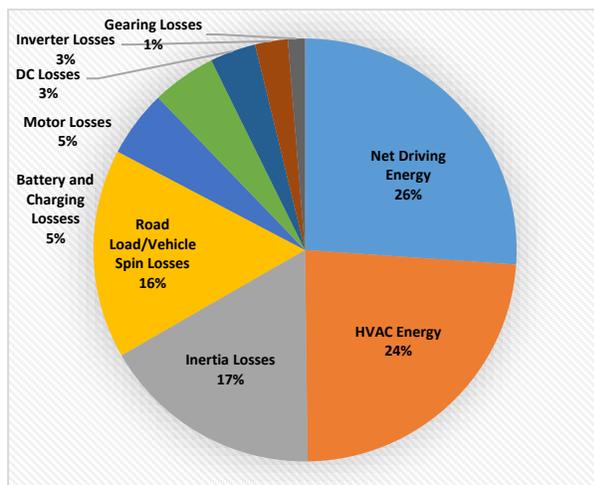


Figura 1. Diagrama circular para la distribución de consumo de energía para un EV.

Fuente: [4].

Razón principal para considerar cualquier cambio vinculado con la reducción del consumo de energía y que involucren cambios en: temperatura, porcentaje de humedad del aire, vibración y ruido, con la finalidad de que la seguridad y el confort de las personas no sea alterado [6].

Anteriormente para los vehículos convencionales, los sistemas de aire acondicionado conformados por un diseño que permitía extraer la suficiente energía del motor para calentar o enfriar el vehículo, sin embargo, en los EV's el consumo de energía eléctrica se encarga de la calefacción y refrigeración a costa de una autonomía de conducción reducida [7].

Los ductos que no están diseñados adecuadamente tienden a aumentar el consumo de energía, mala calidad del aire y altos niveles de ruido, por lo que un sistema de ductos bien diseñado debe de brindar el menor costo operativo, máximo confort y preservar la calidad del aire al interior del vehículo [8].

El análisis del confort térmico adquiere mayor importancia en la industria automotriz debido a los requisitos cada vez más estrictos de economía de combustible y a la creciente popularidad de los vehículos eléctricos [7]. Actualmente, contrario al sistema de HVAC de edificios, la evaluación del confort térmico en vehículos tiene muchas particularidades. Se pueden mencionar los efectos de la radiación solar, una cabina con casi nulo aislamiento térmico, con poca uniformidad de distribución en sensación térmica agradable y principalmente al corto tiempo que se dispone para alcanzar un nivel óptimo de sensación térmica. Todos éstos son factores que figuran como principales limitantes para una evaluación realista y acertada [1].

Limitado por el espacio de empaquetamiento, el diseño de ductos de

aire acondicionado son la parte más difícil del diseño del sistema de aire acondicionado del automóvil [9].

El estudio y análisis de sistemas de HVAC complejos, se basan en cálculos numéricos con suficiente precisión y resultados aceptables, son ahora posibles mediante el uso de tecnología mejorada y técnicas de CFD [10].

CFD es una tecnología eficaz que proporciona datos de relevancia, los cuales mediante métodos experimentales serían imposibles de determinar. En consecuencia, las limitaciones de datos de medición y la reducción de ciclos de diseño han impulsado a la demanda de simulaciones numéricas [11]. Por lo tanto, la simulación asistida por computadora juega un papel vital para lograr resultados óptimos sin pérdida de dinero y tiempo [12].

El objeto de estudio se centra en simulación de CFD mediante el uso del software ANSYS 2023 R2 (versión estudiantil). Se trata de un ducto caracterizado geoméricamente. Para lo su geometría final, se considera la integración de todos los componentes dentro del panel de instrumentos de un vehículo. Se estima numéricamente el rendimiento del ducto (caída de presión, velocidad, temperatura), los cambios geoméricos son consecuencia de la misma integración. Considerando que cualquier potencial o cambio geométrico impacta hacia los componentes adyacentes. El ducto en la entrada, es delimitado por la geometría preestablecida

por el módulo de aire acondicionado, de igual forma la sección de la salida del ducto se adapta a la geometría de entrada de las rejillas para evitar fugas.

METODOLOGIA

Caracterización de un ducto de HVAC para un vehículo. Los ductos presentan en su mayoría formas complejas, debido al espacio de empaquetamiento del que se dispone al interior de la cabina. Como resultado, los ductos tienden a estar impactados por cambios de sección no uniformes a lo largo de su trayectoria, cuyo resultado al final en un análisis de CFD se traduce en caídas de presión y disminución de la velocidad en función de la sección transversal, por lo que:

1. Una sección transversal reducida implica alta velocidad.
2. Una sección transversal grande implica una baja velocidad.

En la **Figura 2**, se muestra un conjunto de ductos que se integran en el panel de instrumentos de un vehículo, así mismo se puede observar que cada ducto es único y singular.



Figura 2. Partes físicas del sistema frontal de HVAC.

Fuente: Elaboración propia.

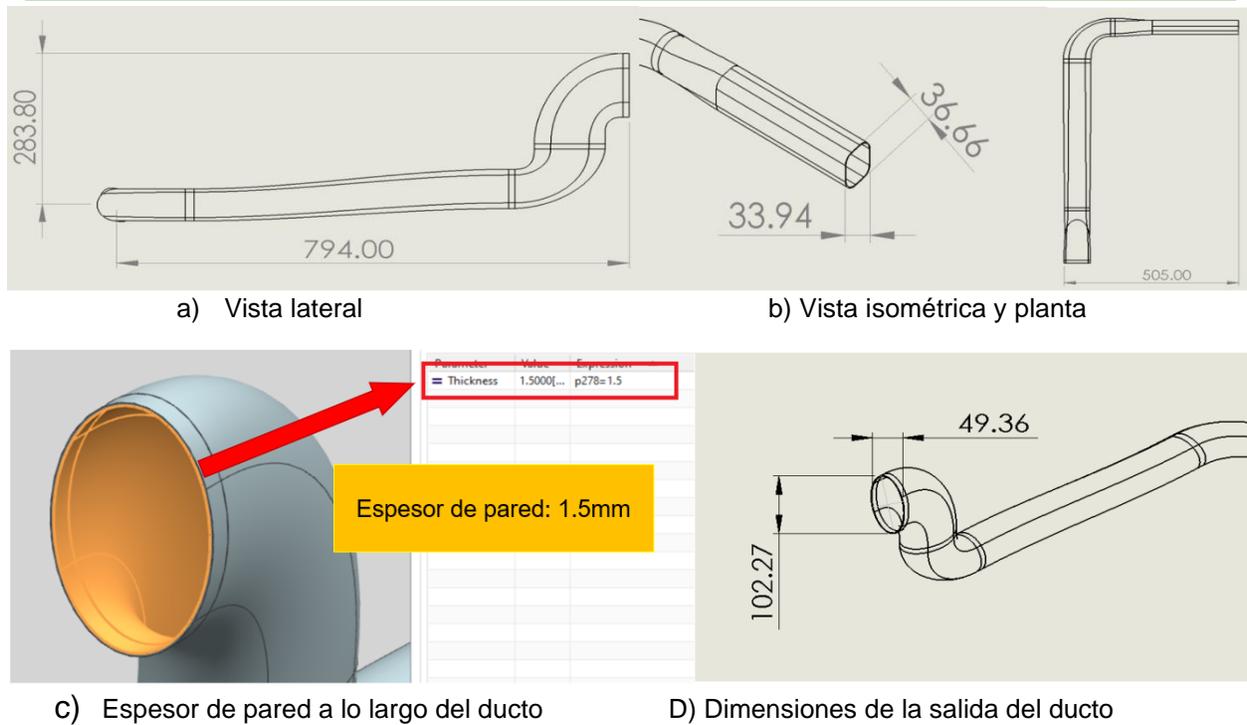


Figura 3. Desarrollo del modelo en 3d de acuerdo con los requerimientos.
Fuente: Elaboración propia.

Ecuaciones gobernantes. El modelo matemático de cualquier problema fundamental de dinámica de fluidos se rige por las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son importantes y representan el fluido como un continuo [13]. Las ecuaciones que rigen el flujo incompresible, viscoso y bidimensional, son la ecuación de continuidad y la ecuación de momento, que en conjunto comprenden las ecuaciones de Navier-Stokes[14].

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{Ec.1})$$

Ecuación de conservación de Momento:

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (\text{Ec. 2})$$

Modelos de Turbulencia. La turbulencia es un tema destacado dentro de la investigación moderna sobre dinámica de fluidos y es un fenómeno natural que ocurre cuando los gradientes de velocidad alcanzan altas velocidades en los fluidos, causando perturbaciones en el dominio del flujo en el tiempo y el espacio[15].

Para este caso de estudio, se utilizará el método k-epsilon (k-ε), una de las ventajas del modelo k-ε esa la hora de efectuar cálculos convergentes con resultados coherentes para distintos regímenes de flujo [16].

Se basa en la resolución de dos ecuaciones; es decir, la ecuación de la energía cinética turbulenta (k) y la ecuación de la tasa de disipación turbulenta (épsilon) [15].

Ecuación k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Ec. 3})$$

Ecuación épsilon:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{Ec. 4})$$

Mecanismos Físicos de Transferencia de Calor. Se ha aprendido del estudio en Termodinámica que la energía se puede transferir mediante interacciones de un sistema con su entorno, estas interacciones se llaman calor y trabajo. Siempre que exista una diferencia de temperatura en un medio o entre medios, debe ocurrir transferencia de calor [17]. Los tres mecanismos físicos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación. Debido a que el ducto se encuentra al interior de la cabina, no tiene interacción con el ambiente por lo que los fenómenos de convección y radiación no son tomados en cuenta para este estudio.

$$\rho C_p \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

Dominio Computacional. Para la discretización y solución de ecuaciones se utilizó el software ANSYS, en el módulo de Fluid Flow (Fluent). Este paquete comercial consta de tres módulos: el preprocesador, el procesador y el

posprocesador. El preprocesador consta de dos partes: la primera parte se utiliza para construir una geometría multiplique, compuesta por un hexaedro sólido, donde se apoya la construcción de mallas tetraédricas numéricas sobre superficies sólidas (representación de la geometría computacional en planta) [18]. La segunda parte se utiliza para generar un archivo donde se eligen los modelos matemáticos generando un modelo numérico. El procesador es un módulo de soluciones numéricas, en el cual se emplean métodos numéricos de volúmenes finitos para resolver el modelo generado en el preprocesador. El posprocesador se utiliza para la visualización científica de los resultados obtenidos. En el módulo del procesador en forma de mapas de color, gráficos vectoriales y animaciones [18].

Preprocesamiento. Esta etapa toma en cuenta la geometría del componente a evaluar, el dominio computacional, y el mallado.

A continuación, en la **Figura 5** dada la geometría del ducto previamente exportada con la extensión IGES, se extrae el volumen de control.

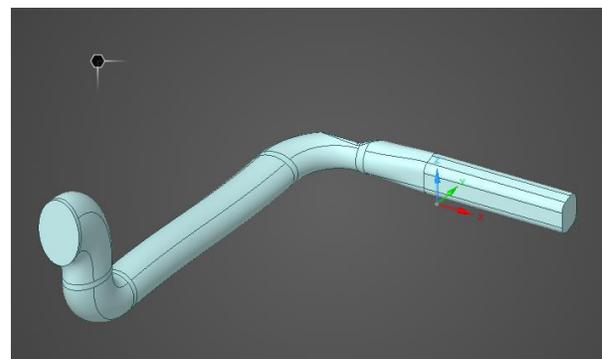


Figura 5. Volumen de control del ducto a evaluar.
Fuente: Elaboración propia.

Al igual a otros métodos numéricos desarrollados para la simulación del flujo de fluidos, el método del volumen finito transforma el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de un sistema acoplado [19].

En la **Figura 6**, el módulo de Fluent trabaja con base en una serie de procesos para los cuales se necesitan cumplir cada uno de ellos, si alguna de las etapas no se cumple, la subsecuente no puede ser procesada hasta que se solucione el error que lo antecede.

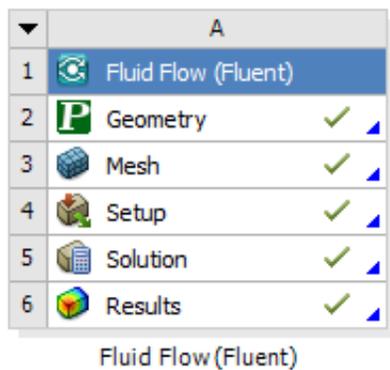


Figura 6. Interfaz de Fluent y sus submódulos.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 7**, se puede observar el submódulo de Fluent, en donde el tamaño del elemento es de 5 mm, esto se debe a la restricción de la versión estudiantil para contener cierto número de elementos máximos para su análisis.

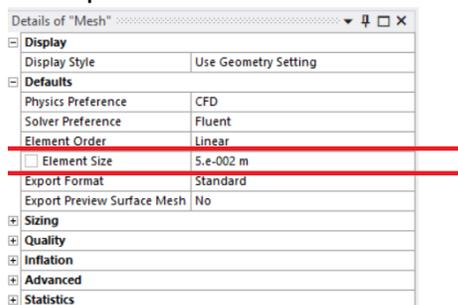


Figura 7. Tamaño de elemento óptimo definido por Fluent. **Fuente:** Elaboración propia.

En la **Tabla 1**, se enlistan cada uno de los tamaños propuestos de malla, es importante mencionar que la calidad de la malla juega un papel importante en la precisión y estabilidad del cálculo numérico. El término “Skewness” se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Una regla general es que la asimetría máxima para una malla triangular/tetraédrica en la mayoría de los flujos debe mantenerse por debajo de 0.95, con un valor promedio inferior a 0.33. Un valor máximo superior a 0.95 puede generar dificultades de convergencia y quizá requiera cambiar los controles del solucionador [20].

Tabla 1. Detalle de la malla tetraédrica.

Tamaño de Malla(m)	Número de elemento s	Nro de nodos	Skewness
0.1	83881	17395	0.798
0.05	88280	18216	0.789
0.03	92793	19047	0.789
0.005	243532	48412	0.799

En la **Figura 8**, se observa a detalle el elemento mallado el cual cumple el respectivo chequeo de calidad de malla.

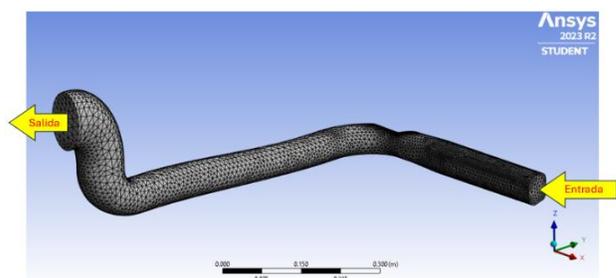


Figura 8. Mallado del volumen de control.
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de estudio se pretende analizar 4 distintos tipos de tamaño de malla y analizar su influencia en los parámetros de entrada y de salida, los tamaños de elemento propuestos son: 100 mm, 50 mm, 30 mm y 5 mm.

Procesamiento. Consiste en resolver los modelos físicos y/o matemáticos que describen el fenómeno (masa, energía y/o momento). Al mismo tiempo, se asignan las fronteras, las cuales son valores iniciales para todas las variables. En la **Figura 9**, se observa la pestaña Configuración paralela de FLUENT Launcher, donde se puede especificar la dimensionalidad del problema (2D o 3D), así como otras opciones (por ejemplo, si se desea un cálculo de precisión simple o doble).

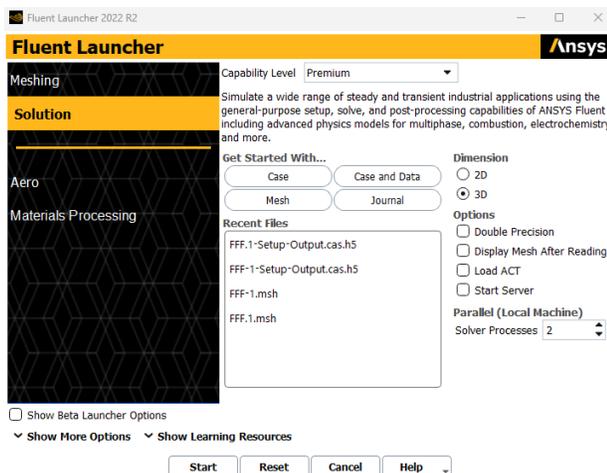


Figura 9. Interfaz gráfica inicial de Fluent.
Fuente: Elaboración propia

En el panel de navegación de ANSYS FLUENT se encuentran una lista de tareas como se muestra en el apartado de **Set up**, en la **Figura 10**, se ingresan todas las condiciones y propiedades del volumen de control, tomando en cuenta las

condiciones ya previamente mencionadas.

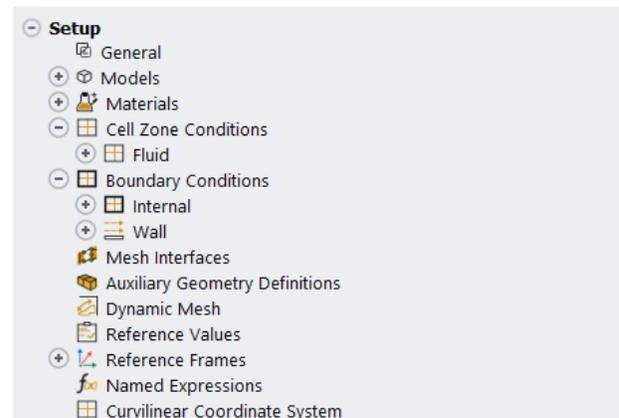


Figura 10. Set up con las condiciones iniciales.
Fuente: Elaboración propia.

Set up:

- i. Models:
 - a. Energy: on.
 - b. Viscous: Standard K.e.
- iii. Cell Zone:
 - a. Aire: Fluid.
 - b. iv. Boundary conditions
 - c. turbulent dissipation: First order upwind
- v. Métodos:
 - a. Velocity inlet: ver **Tabla 2**.

El caso de estudio considera las siguientes condiciones:

-La condición de límite de velocidad se indican en la **Tabla 2**.

-Condición de presión de salida (presión atmosférica) es aplicada en la salida del ducto.

Tabla 2. Parámetros iniciales a la entrada del conducto.

Iteración	Velocidad de entrada(m/s)	Tamaño de malla(m)
1		0.1
2	1.2	0.05
3		0.03
4		0.005
5		0.1
6	1	0.05
7		0.03
8		0.005
9		0.1
10	0.8	0.05
11		0.03
12		0.005
13		0.1
14	0.6	0.05
15		0.03
16		0.005

Cualquier problema que involucre un análisis de CFD resulta ser iterativo, el primer paso que se debe de realizar es inicializar las variables de solución. En el apartado de “**Solution**” cómo se muestra en la **Figura 11**, es imperativo realizar este proceso ya que es crucial para cualquier simulación de CFD, porque cuanto más cerca esté la suposición inicial de la solución final, más rápida será la convergencia [21].

En el apartado de “**Run Calculation**” se encuentran los valores subjetivos que decidirán la convergencia y la precisión de la solución, ver **Figura 12**.

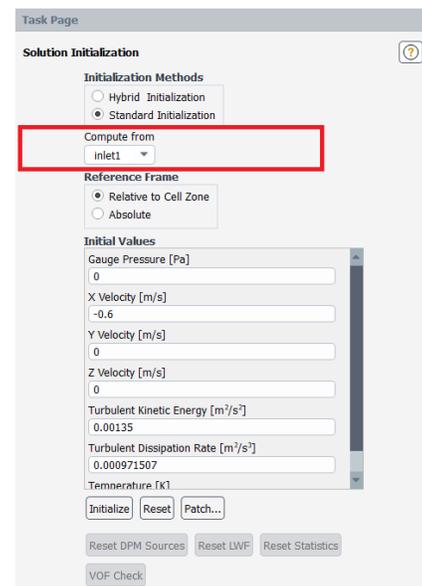


Figura 11. Inicialización del proceso.
Fuente: Elaboración propia.

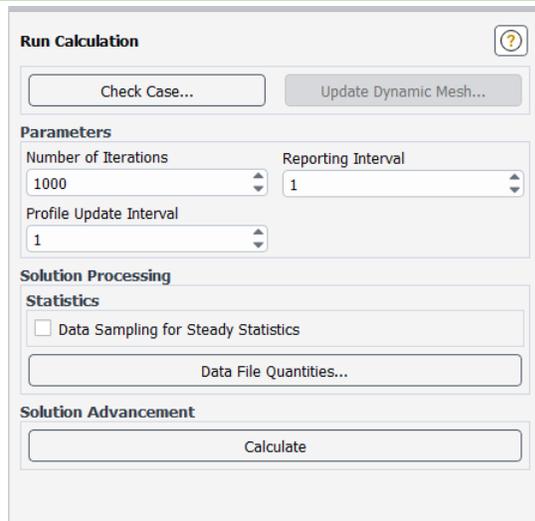


Figura 12. Numero de iteraciones para el caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Una manera de verificar la convergencia de una solución en ANSYS Fluent, es a través del monitoreo de los residuos de las variables clave como: energía, continuidad y velocidad. Los residuos son una ecuación en una iteración en la que se compara con una tolerancia especificada. Si el residual es menor que la tolerancia, se considera que esa ecuación ha convergido durante un período de tiempo [22]. Los valores de convergencia vienen predefinidos por el software (**Figura 13**).

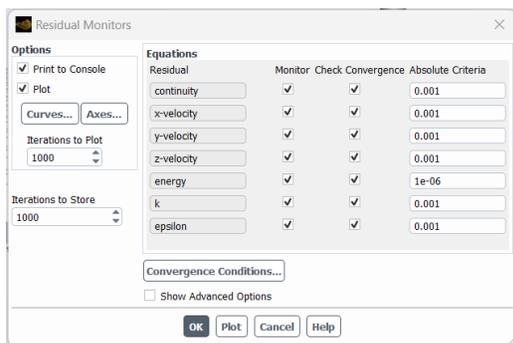


Figura 13. Monitor de residuales que muestra la convergencia relativa o absoluta.

Fuente: Elaboracion propia.

La seccion de “**Monitors**” es un forma visual de interpretar los residuos es a partir del monitor, como se muestra en la **Figura 14**, las curvas de continuidad, energia y velocidad tienden a ser asintoticas alrededor de ciertos valores respectivamente.

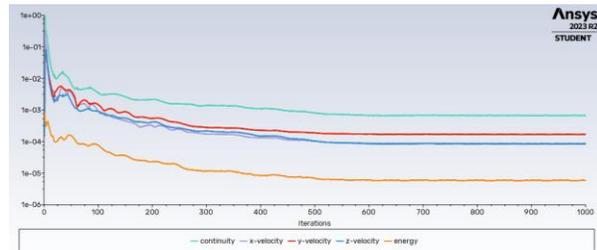


Figura 14. Grafica de residuales para el caso de estudio.

Fuente: Elaboracion propia.

Post-procesamiento. Los resultados son expresados en forma gráfica mediante “líneas de corriente”, es importante mencionar que dichas líneas corresponden a la velocidad del flujo de aire a lo largo del ducto (**Figura 15**).

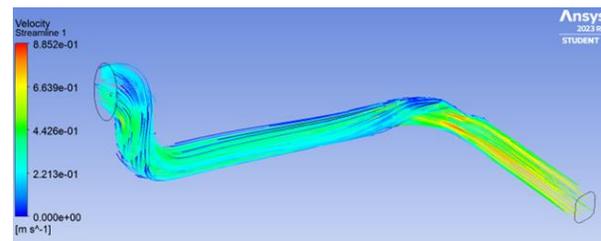


Figura 15. Gráfico de líneas de corriente de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

A continuación, para este trabajo de investigación en el cual se llevaron a cabo un total de 16 simulaciones de CFD, que comprende los 4 tamaños de malla previamente mencionados, y los valores

de velocidad en la entrada del ducto igualmente mencionados en la **Tabla 2**.

Mediante un análisis estadístico de ANOVA de diseño de bloques completos al azar, se busca determinar la influencia que tienen la variación de la velocidad a la

entrada y el tamaño de malla sobre los parámetros de salida de acuerdo con la tabla en el ducto (temperatura, caída de presión y velocidad), determinar el grado de implicación en el fenómeno y determinar si son un factor determinante a la hora de realizar simulaciones de CFD.

Tabla 3. Comparación de tamaño de malla(mm) y velocidad de entrada(m/s), velocidad de salida (m/s).

Velocidad de entrada (ms ⁻¹)	Tamaño de malla (m)			
	0.1	0.05	0.03	0.005
1.2	0.43478853	0.4272471	0.4343248	0.49207464
1	0.35757528	0.35574099	0.35756411	0.40680174
0.8	0.28224202	0.28076319	0.27718383	0.32328127
0.6	0.20493387	0.20703754	0.20710533	0.24253501

Tabla 4. ANÁLISIS DE VARIANZA para la malla y velocidad de salida.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculado	Probabilidad	Valor para F (grados de libertad, $\alpha=0.95$)
Velocidad de salida	0.11972126	3	0.039907087	1305.868786	3.41496E-12	3.862548358
Tamaño de malla	0.006720937	3	0.002240312	73.30913258	1.20539E-06	3.862548358
Error	0.000275038	9	3.05598E-05			
Total	0.126717236	15				

Tabla 5. Comparación de tamaño de malla (m) y velocidad (ms⁻¹), temperatura de salida (K).

Velocidad de entrada	Tamaño de malla (m)			
	0.1	0.05	0.03	0.005
1.2	309.11004	309.00495	309.09264	309.51284
1	308.06824	307.75956	308.12498	308.32141
0.8	306.6931	306.48788	307.67292	307.00675
0.6	305.59074	304.95559	305.78176	305.50942

Tabla 6. ANÁLISIS DE VARIANZA para la malla y Temperatura de salida.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor para F (grados de libertad, $\alpha=0.95$)
Velocidad	30.2781347	3	10.0927116	154.889906 4	4.6113E-08	3.8625483 6
Tamaño de malla	0.91206304	3	0.30402101	4.66572198 6	0.03127034	3.8625483 6
Error	0.58644495	9	0.06516055			
Total	31.7766427	15				

Tabla 7. Comparación de tamaño de malla (m) y velocidad (ms^{-1}), caída de presión (Pa).

Velocidad	Tamaño de malla (m)			
	0.1	0.05	0.03	0.005
1.2	0.30772803	0.29644755	0.32273124	0.47231273
1	0.28600021	0.28582983	0.29917432	0.42165247
0.8	0.25654696	0.25769546	0.26253519	0.35057356
0.6	0.20619429	0.20756923	0.20509934	0.27412213

Tabla 8. ANÁLISIS DE VARIANZA para la malla y presión total.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor para F (grados de libertad, $\alpha=0.95$)
Velocidad	0.03647078	3	0.01215693	25.641574 7	9.6354E-05	3.86254836
Tamaño de malla	0.03891598	3	0.01297199	27.360724 2	7.4319E-05	3.86254836
Error	0.00426699	9	0.00047411			
Total	0.07965375	15				

De acuerdo con ANOVA, el cual nos permite responder a la pregunta de si hay alguna diferencia significativa en relación con variación de la velocidad a la entrada y el tamaño de malla; sobre los

parámetros de salida. Si se observan los valores de las columnas para F en la **Tablas 4, 6 y 8**, el valor de F siempre estuvo fuera del rango de los valores de F (grados de libertad), Entonces se deduce

que si existe una diferencia significativa entre la variación de la velocidad a la entrada y el tamaño de malla; sobre los parámetros de salida.

CONCLUSIONES

Debido a la complejidad del cómputo y a la versión del software, el estudio se limitó exclusivamente al fenómeno de conducción en el ducto. Si se considera un análisis de diversos arreglos de geometrías de acuerdo con la distribución de componentes con los que interactúa el ducto, y además de considerar distintos modelos y parámetros que indiscutiblemente requieren de una mayor capacidad de procesamiento.

De acuerdo con el resultado obtenido mediante el ANOVA de bloques aleatorios al azar, la diferencia de temperatura, caída de presión y velocidad en la salida del ducto respecto de la entrada, es considerable, para la cual, el tamaño de la malla no arroja valores que sean significativos o que tiendan a alterar los datos significativamente. Sin embargo un tamaño de malla más refinado y posterior procesamiento repercuten en la capacidad de cómputo y en el tiempo invertido, por lo que se necesita un balance entre el grado de convergencia y el tiempo del que se dispone, en este caso en particular se confirma la viabilidad de utilizar el tamaño de elemento propuesto en un inicio por el software.

A nivel de subsistema vehicular se recomienda atender los siguientes escenarios:

- 1- El prototipo es una modificación del diseño original realizado en un software de CAD para replicar la condición real de operación e instalación del ducto.
- 2- Al considerar las evaluaciones de CFD, la visualización de los patrones de flujo, pueden ayudar en el proceso de diseño, evaluación y optimización, de este modo se pueden realizar modificaciones y visualizar su viabilidad, antes de su implementación. Como se observa en la **Figura 16**, se identificó una zona de recirculación que repercute en el cambio de velocidad del flujo. En este caso, se recomienda realizar una modificación geométrica que permita atenuar o eliminar en la medida de lo posible dicho fenómeno. Es recomendable que el radio de giro del ducto sea suave siempre y cuando el ambiente en la integración lo permita.

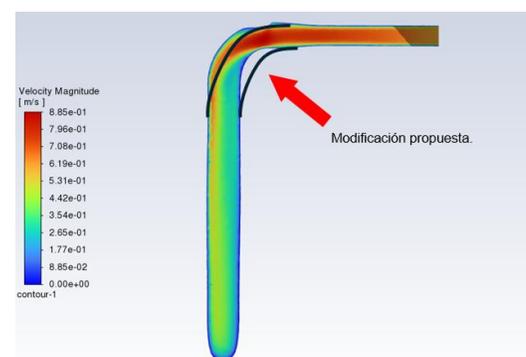


Figura 16. Modificación del ducto propuesta para suavizar la ruta.

Fuente: Elaboración propia.

NOMENCLATURA

p = Presión estática(Nm^{-2}).

u_i y u_j = Componentes promedio de la velocidad(ms^{-1}).

x_i y x_j = Coordenadas de los componentes (m).

P = Presion ejercida en cada microelemento (Pa).

μ_{eff} = Coeficiente de viscosidad turbulenta efectiva (Pa s).

G_k = Es la tasa de generación de energía cinética turbulenta como resultado de los gradientes de velocidad medios.

G_b = Es la tasa de generación de energía cinética de turbulencia gracias a los efectos de flotabilidad.

Y_M = Significa la influencia de la turbulencia incompresible de dilatación fluctuante en la tasa de disipación general.

$C1_\varepsilon$, $C2_\varepsilon$ y $C3_\varepsilon$ = Son constantes del modelo.

S_k y S_ε = Son términos definidos por el usuario.

σ_k y σ_ε son números de Prandtl turbulentos para k y ε , respectivamente.

T = Es la temperatura en un punto determinado (K).

λ = Es la conductividad térmica del aire ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

C_p = Calor especifico aire ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

REFERENCIAS

- [1] L. Pieltain Fernández, T. Gómez San Román, R. Cossent, C. Mateo Domingo, and P. Frías, "Assessment of the impact of plug-in electric

vehicles on distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 206–213, Feb. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2049133.

- [2] I. - International Energy Agency, "Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions," 2023. [Online]. Available: www.iea.org

- [3] A. Lajunen, Y. Yang, and A. Emadi, "Review of Cabin Thermal Management for Electrified Passenger Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 6025–6040, Jun. 01, 2020. doi: 10.1109/TVT.2020.2988468

- [4] V. Champion, A. Allen, and J. Wigston, "Investigating the potential energy savings of MVHR in automotive HVAC systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2022, doi: 10.1177/09544070221080803.

- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Mich. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo 2014.06.15-18 Dearborn, and Mich. ITEC 2014.06.15-18 Dearborn,

- IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2014 15-18 June 2014, Adoba Hotel Dearborn/Detroit, Dearborn, Michigan, USA.*
- [6] A. M. Vranău, C. Bujoreanu, and V. Caunii, "Solutions for Reducing the Energy Consumed by the Automotive HVAC System," *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine constructions Section*, vol. 67, no. 3, pp. 33–38, Sep. 2021, doi: 10.2478/bipcm-2021-0015.
- [7] B. H. Kang and H. J. Lee, "A Review of Recent Research on Automotive HVAC Systems for EVs," *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 25, no. 4, Dec. 2017, doi: 10.1142/S2010132517300038.
- [8] A. Bhatia, "HVAC-How to Size and Design Ducts Credit: 6 PDH HVAC HOW TO SIZE AND DESIGN DUCTS 1 CONTENTS."
- [9] M. Kamada, K. Shimoyama, F. Sato, J. Washiashi, and Y. Konishi, "Multi-objective design optimization of a high efficiency and low noise blower unit of a car air-conditioner," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 233, no. 13, pp. 3493–3503, Nov. 2019, doi: 10.1177/0954407019827131.
- [10] G. Sevilgen and M. Kilic, "Three dimensional numerical analysis of temperature distribution in an automobile cabin," *Thermal Science*, vol. 16, no. 1, pp. 321–326, 2012, doi: 10.2298/TSC11201321S.
- [11] T. Sun, Q. Jiang, and P. Wang, "CFD-based modeling of heat transfer in a passenger compartment," in *Automotive Air Conditioning: Optimization, Control and Diagnosis*, Springer International Publishing, 2016, pp. 3–12. doi: 10.1007/978-3-319-33590-2_1.
- [12] J. Suriyakumar and G. Anbazhagan, "Computer-Aided Simulation of Automotive Air Conditioning System," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2272/1/012013.
- [13] C. Ranganayakulu and K. N. Seetharamu, *Compact Heat Exchangers – Analysis, Design and Optimization using FEM and CFD Approach*, vol. 1. Wiley, 2018.
- [14] "ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide".
- [15] K. Kwang-Yong, A. Samad, and E. Benini, *Design Optimization of Fluid Machinery*. 2019.

- [16] C. Andrés *et al.*, “IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA MÁS ADECUADO, UTILIZANDO SOFTWARE DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, PARA EL DISEÑO DEL VEHÍCULO URBANO DE LA COMPETENCIA SHELL ECO MARATHON,” 2015.
- [17] T. L. Bergman, Adrienne. Lavine, and F. P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass transfer*.
- [18] Z. Driss, B. Necib, and H.-C. Zhang, *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*. Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-70945-1.
- [19] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish, “Fluid Mechanics and Its Applications The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/5980>
- [20] “ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide - 6.2.2 Mesh Quality.” Accessed: Apr. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>
- [21] “Parameters – Run Calculation.” Accessed: Apr. 27, 2024. [Online]. Available: <https://forum.ansys.com/forum/topic/parameters-run-calculation/>
- [22] “ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide - 26.13.1 Monitoring Residuals.” Accessed: Apr. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node812.htm>