

**CENTRO DE TECNOLOGIA AVANZADA
CIATEQ**

**Maestría en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Manufactura
Avanzada.**

***Optimización de diseño de tolva del sistema de enfriamiento de un
vehículo.***

Por

Ing. Gabriel Fernández Dávila.

gabriel.fernandezdavila@gm.com

Participantes:



ABSTRACT

En el mercado automotriz global, General Motors es un jugador importante, por lo que resulta de vital importancia mantener una creciente y nueva gama de productos con alto grado de innovación y tecnología al mejor costo. La regla es simple: Ser los primeros en alcanzar el mercado con el producto correcto, en el segmento correcto al precio correcto.

Los diferentes protagonistas, dentro de la industria automotriz global tienen un dinamismo que cambia todos los días, como evidencia podemos decir el tiempo de desarrollo de los vehículos se ha reducido considerablemente en las últimas décadas.

Uno de los propósitos del presente estudio, es enfatizar el uso de distintas herramientas tecnológicas (CAD, CAE, Design For Six Sigma, Design For Manufacturing) que han ayudado a la aceleración del desarrollo de nuevas plataformas automotrices y su subsecuente lanzamiento, así como la necesidad de proveer sistemas automotrices mejorados para competir en un mercado cada vez más complejo.

Este trabajo, intenta estar alineado con la visión de General Motors: **Diseñar, Construir y Vender los mejores vehículos del mundo.** En ese orden de ideas, el proyecto está enfocado al área de enfriamiento de tren motriz, proporcionando un diseño de tolva optimizado para aumentar la capacidad de rechazo de calor de los intercambiadores de calor localizados en el compartimiento de motor, usualmente conocido como CRFM (Condenser, Radiator and Fan Module).

El diseño optimizado de tolva proporcionado es capaz de maximizar la cantidad de aire entregado al CRFM, lo que resulta en la posibilidad de incrementar la capacidad de carga del vehículo en 1,000 libras, ante un aumento de flujo de aire de un 5-7%.

La simulación mediante CFD tiene un rol preponderante en este trabajo, pues permite potenciar las posibilidades de mejora al poder evaluar los diferentes diseños en el vehículo completo, ejecutando arreglos ortogonales bajo condiciones de operación normales como en una prueba física, con la gran diferencia del costo y tiempo, pues tomando en cuenta que la hora de túnel climático cuesta alrededor de 10,000 USD, la simulación CFD cobra vital importancia no solo en este trabajo, sino como una muestra de lo que representa en tiempo y costo de desarrollo para General Motors y en general para la industria automotriz.

INTRODUCCION.

La administración del calor dentro de un compartimiento de motor, así como de los sistemas de enfriamiento que integra a un automotor, han sido uno de los tópicos más importantes en el diseño automotriz. Especialmente con las condiciones económicas y ambientales de la actualidad que exigen que toda la energía que se suministra para hacer funcionar a un automotor, sea usada lo más eficientemente, evitando al máximo las pérdidas por calor, fricción o simplemente por un diseño y manufactura mal ejecutado.

La capacidad de disipación de calor en los vehículos, resulta ser uno de las actividades que más valor agregan valor en el proceso de

diseño del tren motriz y aire acondicionado, pues tiene una relación directa con el desempeño del automóvil, así como la robustez que el cliente percibe, del producto que compró.

En el mercado automotriz, la capacidad de carga es una de las características más significativas y más buscadas por los clientes, y específicamente en el segmento de camionetas Full Size Truck, donde la capacidad de carga es un diferenciador que inclina la decisión de compra de los clientes por una marca o por otra.

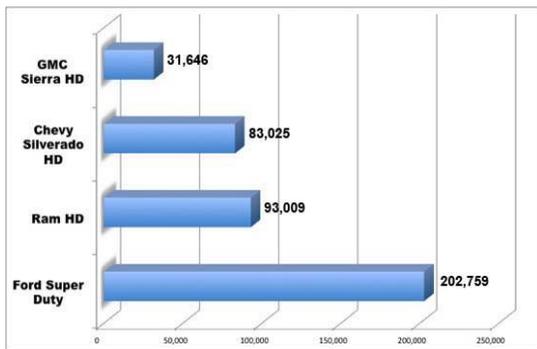


Fig. 1 Unidades vendidas en 2011
En el segmento Full Size Truck

La figura 1 muestra que existe una relación directa entre las ventas en el mercado de Full Size Truck y la capacidad de carga de las camionetas.

Una de las problemáticas clásicas en el diseño del sistema de enfriamiento, es la administración del flujo de aire disponible que proviene del exterior. Esto es debido a que los nuevos diseños de fascias tienden a ser mucho más restrictivas, por un lado para cumplir con ciertas condiciones de estética, y por otro lado, para cumplir con requerimientos de aerodinámica.

Por lo tanto, el principal objetivo del presente proyecto, **será la mejora del flujo disponible en el compartimiento de motor, mediante la optimización geométrica de la tolva**, lo cual tendrá un impacto directo en la capacidad de carga de un vehículo al generar un mayor rechazo de calor en los intercambiadores de calor.

METODOLOGIA

La metodología usada para el trabajo de optimización de la tolva, se basó en el proceso mostrado en la **figura 3**, en donde la etapa inicial del análisis, comienza con la creación en CAD de los modelos base, soportados por la fase de identificación y definición de la metodología DFSS, posteriormente, se procede a la generación de la malla de superficie en donde se crea la totalidad de la malla del vehículo completo para pasar al siguiente proceso, que es la generación de la malla para los componentes que involucran algún volumen. Hasta este momento se tendría el modelo de volumen finito en malla de volumen y de superficie, listo para definir las condiciones de frontera. En la etapa de definición de condiciones de frontera, es donde la mayor parte de las herramientas tecnológicas (**DFM y DFSS**) toman mayor participación y relevancia, ya que serán la base para la mejora del sistema de la tolva.

Hablando de las herramientas de **DFM**, comencé con la definición del problema mediante la aplicación de la herramienta **“To_by_using_while_as_to”**, la cual proporcionó el marco de referencia para definir en una sencilla oración, el alcance del proyecto, posteriormente el **“CVCA”**, me permitió determinar el lugar que ocuparía la solución en un diagrama mostrando la cadena

De valor y los elementos importantes a tomar en cuenta. El “**Schenario graph**” (Fig.30) y el “**Representative Schenario Graph**” (Fig.31) tomaron gran importancia pues permitió la creación del enlace entre el “quien” (clientes en específico) y los “que”, “como”, “donde” para finalmente encontrar el estado de uso de la mejora. El análisis de **QFD** (Fig.32), permitió determinar “**la cantidad de aire**” como la más significativa métrica de ingeniería que mejor representaba el “**VOC**”

En lo concerniente a la aplicación de **DFSS**, podemos decir que fue el elemento aglutinador que propuso el marco de trabajo, orden y método para llevar la investigación por un camino de mejora continua a través de las diferentes etapas del mismo, siendo la mas significativa la parte de optimización pues mediante la aplicación de un arreglo ortogonal **Taguchi L18** y la definición de la estrategia de ruidos, tenemos una optimización, que además es robusta ante ciertas condiciones de operación en donde el cliente es el principal beneficiado, al tener una interacción directa con la robustez propuesta.

Análisis del marco teórico

El análisis del marco teórico esta enfocado en la argumentación de los siguientes ejes: La mecánica de fluidos y la transferencia de calor.

1.-Mecanica de Fluidos

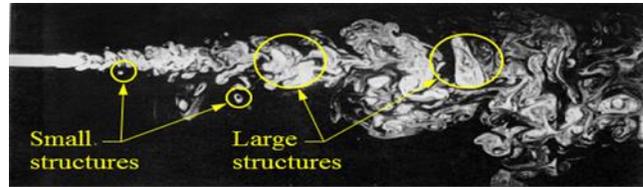


Fig. 4 Diferentes tipos de flujos. Laminar, turbulento y zona de transición.

El número de Reynolds es un criterio usado para determinar el comportamiento del flujo de un fluido

$$R_e = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

-Ecuaciones de Navier-Sokes

1.-Ecuacion de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

2.-Ecuacion de momento en X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

3.-Ecuacion de momento en Y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

4.-Ecuacion de momento en Z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

4.-Ecuacion de energía

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(uP)}{\partial x} - \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(wP)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$

En las líneas anteriores, se muestran las ecuaciones de Navier-Stokes [1] en tres dimensiones para un estado transitorio, que describen la relación entre la velocidad, presión temperatura y densidad de un fluido en movimiento. Por definición, son un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que para fenómenos complejos, resultan un tanto complicadas de resolver, tan es así, que forman parte de los 7 problemas de la ciencia matemática mas importantes, y que no se ha demostrada su solución exacta [2]. Se derivan de las leyes de movimiento de Newton, son las mismas para la solución de cualquier situación de flujo de fluidos. La utilización de la computadora para la solución numérica es lo que ha dado origen a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

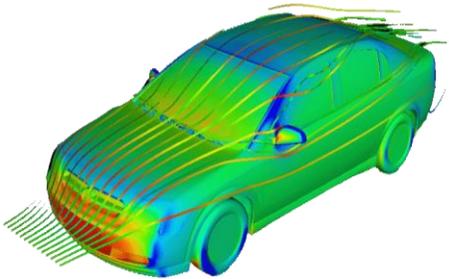


Fig. 5 Líneas de flujo sobre exterior de un automóvil

Considérese, por ejemplo, el flujo del aire alrededor de un coche. En teoría, con las ecuaciones de Navier-Stokes, se puede calcular la velocidad y la presión del aire en cualquier punto (en un caso de flujo compresible o en el que haya transferencia de calor, también son variables a considerar la temperatura y la densidad). Esto permite calcular la resistencia aerodinámica, la adherencia al suelo de los alerones, patrones de flujos de aire, intercambio de calor por convección, conducción o radiación.

Para resolver las ecuaciones, el programa transformará las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, y las resolverá únicamente en un número finito de puntos del espacio. Por eso, lo primero que hay que hacer es representar el vehículo o, mejor dicho, su entorno mediante una malla de cálculo; cuanto mayor sea el número de puntos de esta malla más difícil será de generar y resolver. En casos con geometría complicada, esta fase puede ocupar días e incluso semanas.

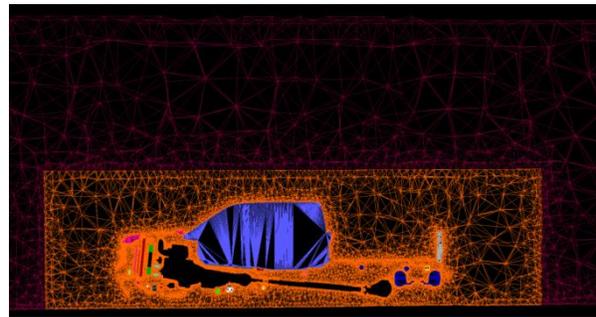


Fig. 6 Sección de corte de una malla de volumen para un modelo de un vehículo completo

-Medios porosos

Los medios porosos resultan ser una parte muy importante del presente análisis ya que es la forma de modelar y simular las restricciones físicas dentro del compartimento de motor.

En este estudio contamos con dos tipos de restricciones:

- Las restricciones de pared
- Las restricciones de medios porosos.

Por definición una restricción de pared es aquella que evita que el flujo de un fluido atraviese la pared, bloqueando al 100%. En cuanto al medio poroso, permite el paso del flujo con un cierto nivel de restricción.

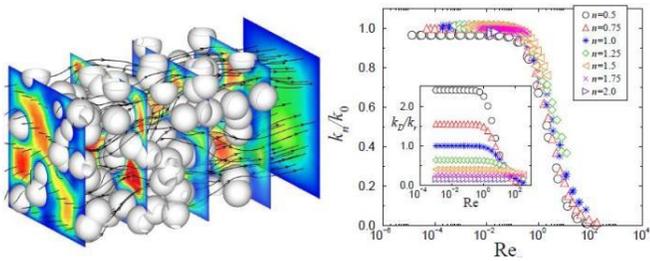


Fig. 7 Medios Porosos y curva de restricción

Los modelos de medios porosos incorporan una restricción al flujo a los cálculos de CFD. En esencia el medio poroso no es más que sumidero que se refleja en las ecuaciones de momento que gobiernan el comportamiento del flujo. Este sumidero contribuye al gradiente de presión en el medio poroso, creando una caída de presión.

Los medios porosos son modelados mediante la adición de dos términos a las ecuaciones de flujo estándar. Estos dos términos provienen de:

- 1.-Termino viscoso (viene dado por la ley de Darcy)
- 2.-Termino inercial.

$$S_i = \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right)$$

Donde S_i es el origen del termino para el i -ésimo elemento de la ecuación de momento.

μ : Es la magnitud de la velocidad

Alfa: La permeabilidad

C_2 : Es el factor de resistencia inercial

μ y ρ : Coeficientes de viscosidad dinámica y densidad del fluido respectivamente

En los flujos laminares que atraviesan medios porosos, la caída de presión es normalmente proporcional a la velocidad y la constante C_2 puede ser despreciada. Sin embargo dentro de los compartimento de motor, la mayoría de los flujos presentes, están lejos de tener un comportamiento laminar, por lo contrario, tienden a ser turbulentos.

La ley de Darcy, describe las características de movimiento de un fluido a través de un medio poroso

$$Q = k \frac{h_3 - h_4}{L} A$$

$Q =$ CAUDAL
 $\frac{h_3 - h_4}{L} =$ GRADIENTE DE ALTURA Y LONGITUD
 $k =$ FACTOR DE RESTRICCION
 $A =$ AREA

Fig. 8 Ley de Darcy

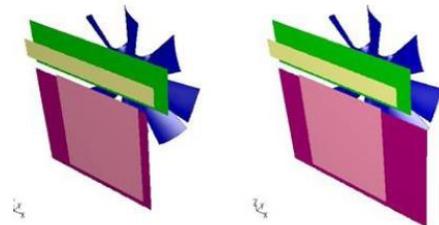


Fig. 9 Configuración de intercambiadores de calor [8]

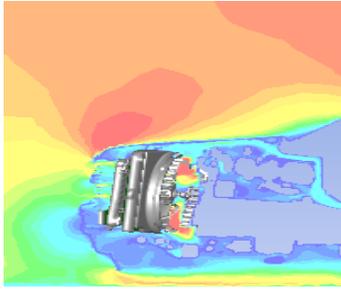


Fig. 10 Distribución de velocidades

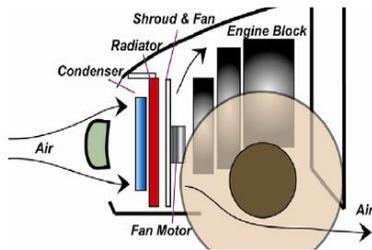


Figura 11. Configuración esquemática De un módulo de enfriamiento en el compartimiento de motor [9]

2.-Transferencia de calor

Dentro del compartimiento de motor podemos destacar los modos de transferencia de calor:

-Transferencia de calor por convección.

$$q_{conv} = h_{ext} (T_{ext} - T_w)$$

-Transferencia de calor por conducción.

-Transferencia de calor por radiación.

$$q_{rad} = \epsilon_{ext} \sigma (T_{\infty}^4 - T_w^4)$$

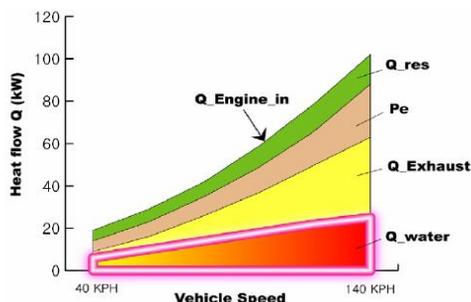


Figura 12. Balance térmico de un motor. Rechazo de calor vs velocidad del vehículo [7]

Los intercambiadores de calor como el Radiador, CAC y ATOC tienen la función de remover el calor generado por el funcionamiento del vehículo en lo que se refiere al tren motriz. Intercambiadores como el condensador ayudan al funcionamiento del sistema de aire acondicionado.

Con todo lo anterior es muy fácil concluir que cualquier tipo de optimización del funcionamiento de estos, tendrá un impacto muy fuerte en: Consumo de combustible incremento de la capacidad de carga o simplemente el cambio de especificación de los intercambiadores por uno más pequeño o más barato.

RESULTADOS

METODOLOGIA: DESIGN FOR SIX SIGMA (DFSS)



IDENTIFICACION

Declaración de la oportunidad:

Obtener el ángulo de ataque óptimo y el número de álabes adecuados en el estator del la tolva para maximizar el flujo de aire hacia los intercambiadores de calor.

Resultado esperado

Aumento en el flujo de aire en el radiador.

Restricciones

-Diseño de los intercambiadores de calor

- Potencia del ventilador
- No hay cambios en la fascia y parrilla.

Hipótesis:

“La optimización geométrica de la tolva, maximizara el flujo de aire a través de los intercambiadores de calor”



DEFINICION

Expectación del cliente	Objetivo	Requerimiento Funcional	Método de evaluación
Capacidad de carga	LTB	CMM (Flujo aire)	CAE

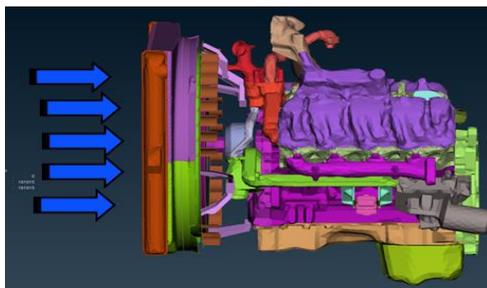


Figura 13. CRFM, Motor y líneas de flujo de aire hacia los intercambiadores de calor

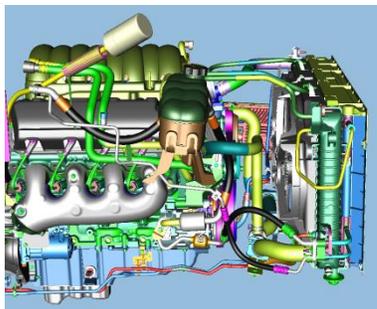


Figura 14. Algunos componentes de compartimiento de motor.



DESARROLLO DEL CONCEPTO



Figura 15. Optimización del anillo de soporte de la tolva y álabes incorporados a la geometría para la mejora del flujo de aire

La respuesta del sistema (Y) resulta ser la cantidad de flujo de aire que reciben los intercambiadores de calor, y como fue definido anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es entregar el diseño optimizado de una tolva que maximice la Y.

Los álabes añadidos al soporte del anillo del CRFM mostrados en la **Figura 15**, ayudan notablemente a optimizar el flujo de aire en los intercambiadores sin embargo dentro de la fase de optimización existen variables como la cantidad de alabes y su orientación que necesitan ser despejadas y resueltas mediante un análisis de sensibilidad. Dicho análisis será descrito en la siguiente fase de DFSS.

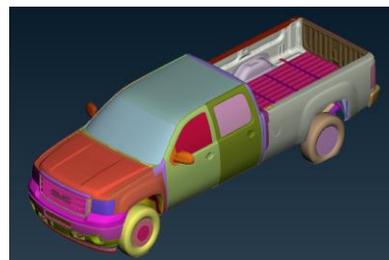


Figura 16. Vista isométrica del modelo de CFD. Vehículo completo escala 1:1 construido para análisis de sensibilidad y robustez



Figura 17. Vista frontal del modelo de CFD. Vehículo completo escala 1:1 construido para análisis de sensibilidad y robustez



Figura 18. Vista lateral del modelo de CFD. Vehículo completo escala 1:1 construido para análisis de sensibilidad y robustez

El diagrama de parámetros mostrado en la Figura 19, nos muestra los componentes del sistema para el análisis de robustez y sensibilidad. Por un lado, tenemos los factores de control con sus respectivos niveles, el sistema a optimizar, la respuesta y los factores de ruido. El diagrama de parámetros se lee de la siguiente forma: Determinar mediante la experimentación, la mejor mezcla de los niveles de los factores de control ante los factores de ruido presentes, que, por un lado maximicen la respuesta del sistema y por otro presente menos perturbación ante la actuación de los factores de ruido (Robustez).



OPTIMIZACION

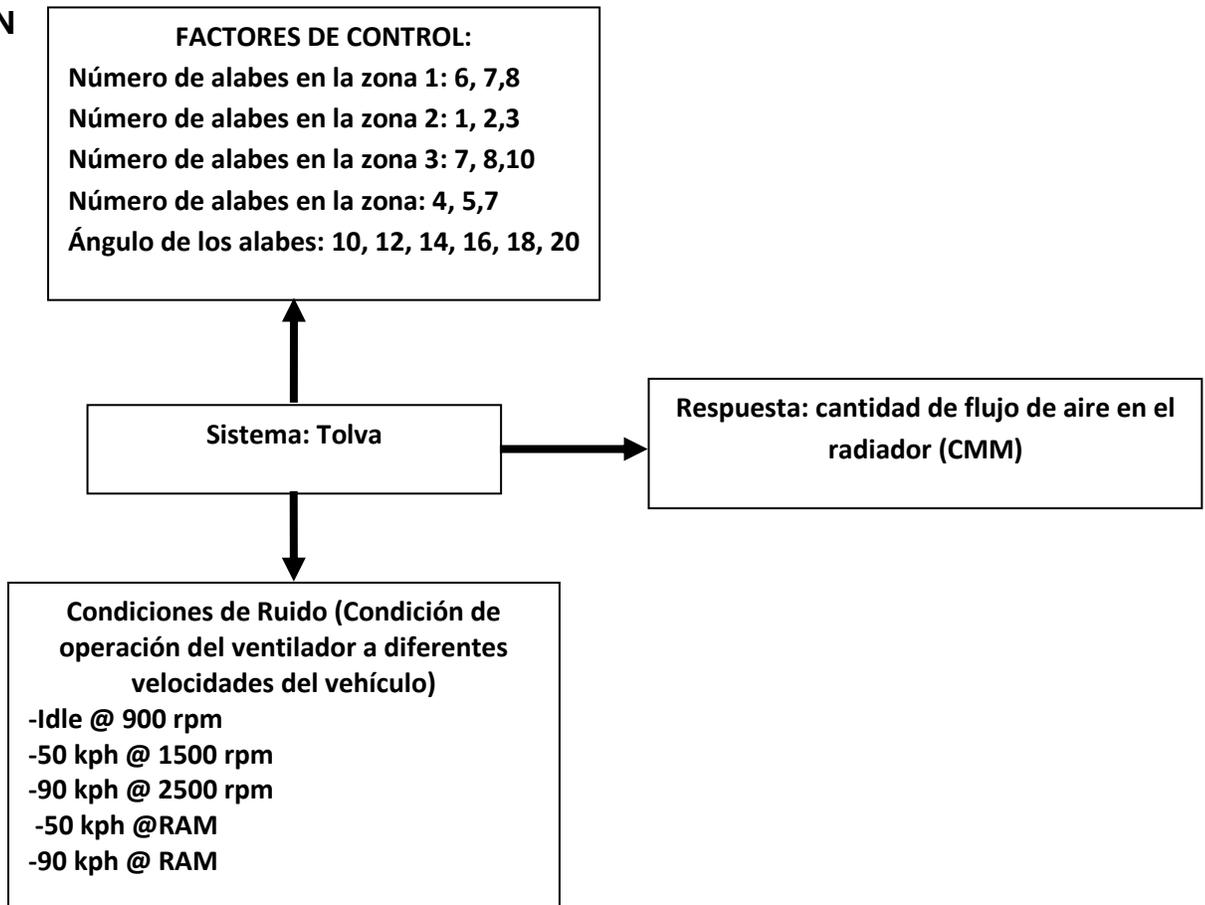


Figura 19. Diagrama de parámetros para la optimización de la tolva

Descripción de los factores de control

-Factor A: ángulo de ataque de los álabes

Niveles: 12, 14, 16, 18, 20 grados

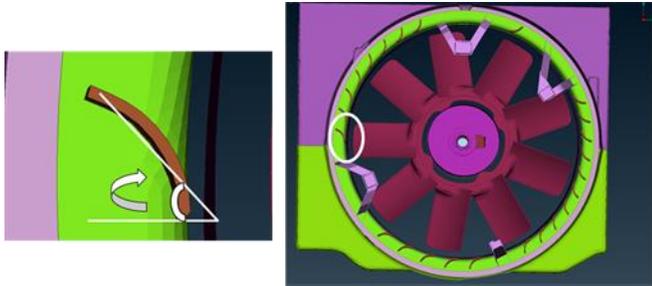


Figura 20. Factor A

-Factores B, C, D y E

B: Numero de álabes en la zona uno: 6, 7, 8 álabes

C: Numero de álabes en la zona dos: 1,2 y 3 álabes

D: Numero de álabes en la zona tres: 7,8 y 10 álabes

E: Numero de álabes en la zona cuatro: 4,5 y 7 álabes



Figura 21. Factor B, C, D y E

Item	Control Factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
6	A: Airfoil angle	10	12	14	16	18	20
1	B: # of airfoils @ Region 1	6	7	8			
2	C: # of airfoils @ Region 2	1	2	3			
3	D: # of airfoils @ Region 3	7	8	10			
4	E: # of airfoils @ Region 4	4	5	7			
Noise factors							
1	N1: Idle @900 rpm fan						
2	N2: 50 kph @1500 rpm						
3	N3: 90 kph @2500 rpm						
4	N4: 50 kph ram						
5	N5: 90 kph ram						

Figura 22. Estrategia de ruidos y factores de control para un arreglo L18 Taguchi.

	A	B	C	D	E	Noise conditions N1	Noise conditions N2	Noise conditions N3	Noise conditions N4	Noise conditions N5
1	Airfoil angle at 10	6 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	Idle @900 rpm fan	N2: 50 kph @1500 rpm	90 kph @2500 rpm	50 kph ram	N5: 90 kph ram
2	Airfoil angle at 10	7 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4					
3	Airfoil angle at 10	8 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4					
4	Airfoil angle at 12	6 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4					
5	Airfoil angle at 12	7 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4					
6	Airfoil angle at 12	8 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4					
7	Airfoil angle at 14	6 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4					
8	Airfoil angle at 14	7 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4					
9	Airfoil angle at 14	8 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4					
10	Airfoil angle at 16	6 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4					
11	Airfoil angle at 16	7 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4					
12	Airfoil angle at 16	8 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4					
13	Airfoil angle at 18	6 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4					
14	Airfoil angle at 18	7 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4					
15	Airfoil angle at 18	8 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4					
16	Airfoil angle at 20	6 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4					
17	Airfoil angle at 20	7 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4					
18	Airfoil angle at 20	8 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4					

Figura 23. Matriz decodificada de experimentación

CONCLUSIONES

1. El diseño numero 3 de la tabla experimental mostrado en la **figura 24**, presenta un incremento en el flujo de aire medido en el radiador con respecto al diseño base (sin álabes).
2. La adición de álabes representa una optimización del sistema, sin embargo, la adición no debe ser arbitraria, pues el análisis de sensibilidad

mostro diseños con álabes cuyo rendimiento era menor al modelo base (sin alabes).

3. Los factores de control resultaron significativos y con influencia en la respuesta del sistema.
4. La presencia de los álabes tiene un impacto directo cuando el ventilador se encuentra en funcionamiento.

BIBLIOGRAFIA

- [1].-R. Temam, "Navier-Stokes equations", North-Holland, New York, 1979.
- [2].-"Simulación numérica de flujos", Universidad de Oviedo, pág. 7, España, 2011
- [3].-H.J. Kim, C.-J. Kim / Applied Thermal Engineering 28 (2008)
- [4].-C. H. Tai, C. G. Cheng/ A practical and Simplified Airflow Simulation to Assess Underhood Cooling Performance, Detroit, Michigan.
- [5].-Tim. Juan/ Investigation and Assessment of factors Affecting the underhood Cooling Air Flow
- [6].-Cenguel y Simbala/ Fundamentos de transferencia de Calor y Mecánica de Fluidos
- [7].-Hak Jun Kim, Charn Jung Kim / A numerical analysis for the cooling module related to automobile air conditioning system
- [8].-Tim Juan, Investigation and assessment of factors Affecting the underhood Cooling Air Flow using CFD. SAE paper 2008-01-2658

[9]. - Hak Jun Kim, Charn Jung Kim / A numerical analysis for the cooling module related to automobile air conditioning system

PALABRAS CLAVE

- 1.-DFSS: Design For Six Sigma
- 2.-Full Size Truck: Segmento de camionetas de carga
- 3.-CAD: Computer Aided Design
- 4.-CAE: Computer Aided Engineering
- 5.-CFD: Computer Fluid Dynamics
- 6.-DFM: Design for Manufacturing
- 7.-CVCA: Customer Value Chain Analysis
- 8.-QFD: Quality Function Deployment
- 9.-VOC: Voice of the Customer
- 10.-IDLE: Condición en la que el vehículo se encuentra en velocidad de 0 kph pero con el motor encendido
- 11.-RAM: Condición en la que el vehículo se encuentra en movimiento con el ventilador apagado
- 12.-POWER: Condición en la que el vehículo se encuentra en movimiento con el ventilador encendido.
- 13.-CMM: Cubic Meter per Minute

RESULTADOS DE ARREGLO ORTOGONAL

						Volumetric flow									
						Noise conditions 1		Noise conditions 2		Noise conditions 3		Noise conditions 4		Noise conditions 5	
	A	B	C	D	E	m3/s	m3/min	m3/s	m3/min	m3/s	m3/min	m3/s	m3/min	m3/s	m3/min
1	Airfoil angle at 10	6 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	0.804	48.232	1.788	107.274	3.201	192.030	0.474	28.460	1.000	59.974
2	Airfoil angle at 10	7 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4	0.831	49.864	1.783	106.973	3.203	192.183	0.476	28.584	1.003	60.150
3	Airfoil angle at 10	8 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4	0.831	49.865	1.806	108.358	3.236	194.131	0.487	29.240	1.002	60.111
4	Airfoil angle at 12	6 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4	0.783	46.979	1.773	106.352	3.192	191.517	0.489	29.334	1.005	60.285
5	Airfoil angle at 12	7 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4	0.789	47.315	1.782	106.920	3.218	193.073	0.488	29.288	1.003	60.163
6	Airfoil angle at 12	8 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	0.782	46.937	1.790	107.422	3.223	193.366	0.489	29.351	1.005	60.322
7	Airfoil angle at 14	6 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4	0.772	46.342	1.783	106.986	3.218	193.082	0.488	29.304	1.004	60.210
8	Airfoil angle at 14	7 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	0.777	46.638	1.786	107.144	3.231	193.854	0.488	29.277	1.001	60.060
9	Airfoil angle at 14	8 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4	0.793	47.590	1.789	107.328	3.227	193.629	0.489	29.342	1.006	60.373
10	Airfoil angle at 16	6 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4	0.776	46.530	1.785	107.070	3.222	193.344	0.489	29.322	1.005	60.282
11	Airfoil angle at 16	7 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4	0.764	45.864	1.777	106.620	3.217	193.000	0.490	29.383	1.007	60.449
12	Airfoil angle at 16	8 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	0.776	46.560	1.785	107.100	3.229	193.746	0.489	29.334	1.005	60.282
13	Airfoil angle at 18	6 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	0.774	46.464	1.777	106.620	3.222	193.314	0.489	29.340	1.006	60.360
14	Airfoil angle at 18	7 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4	0.764	45.846	1.787	107.220	3.230	193.800	0.488	29.304	1.004	60.240
15	Airfoil angle at 18	8 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4	0.753	45.192	1.777	106.608	3.227	193.620	0.490	29.394	1.006	60.360
16	Airfoil angle at 20	6 airfoils at region 1	3 airfoils at region 2	8 airfoils at region 3	7 airfoils at region 4	0.790	47.394	1.779	106.711	3.216	192.955	0.476	28.575	1.000	60.007
17	Airfoil angle at 20	7 airfoils at region 1	1 airfoils at region 2	10 airfoils at region 3	4 airfoils at region 4	0.789	47.349	1.791	107.474	3.224	193.411	0.476	28.576	1.001	60.034
18	Airfoil angle at 20	8 airfoils at region 1	2 airfoils at region 2	7 airfoils at region 3	5 airfoils at region 4	0.760	45.603	1.771	106.269	3.222	193.293	0.489	29.333	1.004	60.227
BASE LINE						0.745	44.694	1.694	101.657	3.088	185.284	0.480	28.806	1.006	60.341

Figura 24. Tabla de resultados arreglo ortogonal
Taguchi L18

FIGURAS DE REFERENCIA

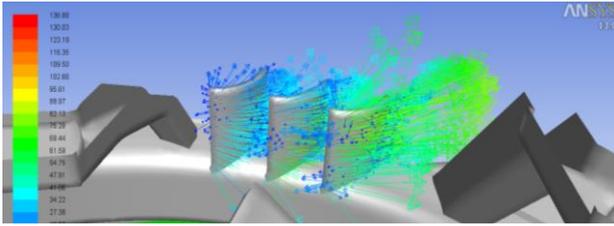


Figura 25. Vectores de velocidad actuando sobre los álabes del anillo.

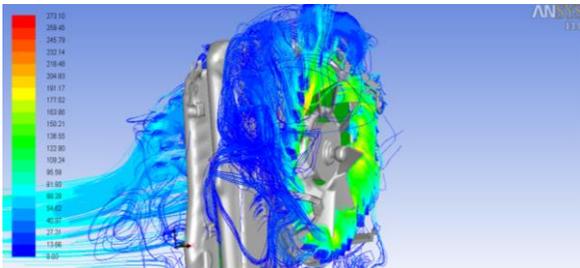


Figura 29. Líneas de flujo coloreadas por velocidad Sobre el CRFM

