

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE PARTÍCULAS DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E. LATACUNGA.

Arrieta Barbour Alan Germán, Espinoza Yumi Carlos David*

*Egresados de la Carrera de Ingeniería Mecánica ESPE

RESUMEN

Este proyecto surgió de la necesidad que existía en el área de pintura especial del Centro de Producción de la ESPE sede Latacunga, donde el proceso de pintado se encontraba incompleto en sus fases, al no existir un ambiente controlado de trabajo para pintar los productos manufacturados en este Centro de Producción.

Para llevar a cabo este proyecto se tomaron en cuenta varios aspectos como: el espacio físico disponible, el presupuesto asignado, la utilización de los conocimientos adquiridos y la investigación necesaria para el cumplimiento satisfactorio de los objetivos buscados.

Se procedió a diseñar la cabina, llegando a establecerse una cabina tipo Batch, una base metálica móvil de trabajo con la ayuda del software SAP2000.

Se seleccionó el sistema de recolección más adecuado (sistema de panel de filtros con un cuarto de succión independiente), un ventilador de tipo centrífugo para generar la presión negativa necesaria para obtener una alta eficiencia de captación.

Los programas utilizados para analizar la dinámica del fluido de este sistema fueron: ANSYS FLUENT versión 12.1 y FLOWIZARD versión 2.0.4. Las pruebas de captación de pintura dieron como resultado un promedio de eficiencia del 68%. El promedio de velocidad del aire medido en la cara abierta de la cabina es de 0.5 m/s. Se realizó un análisis económico y financiero para calcular la depreciación del sistema completo, y además el tiempo de recuperación de la inversión total, el cual resultó en un ahorro mensual de \$421.88 La inversión total será recuperada en aproximadamente 10 meses.

Palabras clave: recolección, ventilador, pintura electrostática, fluidos, captación, velocidad del aire.

This project arose from the need that existed in the area of special paint Production Centre based ESPE Latacunga, where the painting process was incomplete in its early stages, the absence of a controlled environment for painting work on manufactured goods the Production Center. To carry out this project took into account several aspects such as physical space, the budget, the use of knowledge and research required for the successful fulfillment of the objectives. We proceeded to design the cabin, arriving at a booth set up Batch, a working mobile metal base with the help of software SAP2000.

We selected the most appropriate collection system (system panel filter with suction quarter alone), a centrifugal fan to generate the necessary negative pressure for high collection efficiency. The software used to analyze the fluid dynamics of this system were: ANSYS FLUENT version 12.1 and FLOWIZARD version 2.0.4. Uptake tests resulted painting an average efficiency of 68%. The average air velocity measured in the open side of the face is 0.5 m / s. We performed a financial and economic analysis to calculate the depreciation of the entire system, and also the recovery time of total investment, which resulted in monthly savings of \$ 421.88 total investment will be recovered in about 10 months.

Key words: collecting, fan, electrostatic painting, fluid collection, air velocity.

INTRODUCCIÓN

El proyecto a desarrollarse a lo largo de este documento está destinado al beneficio del Centro de Producción ESPE sede Latacunga. Esta es una empresa dedicada a la fabricación de muebles metálicos de oficina y otros.

Los muebles metálicos pasan por una serie de procesos hasta llegar al acabado final y su posterior entrega. El primer punto es el ensamble metal mecánico, posteriormente se somete a un proceso de pintura electrostática donde las partículas de polvo de la pintura se cargan eléctricamente mientras el mueble metálico a pintar está conectado a tierra, lo que produce una atracción electrostática que permite adherirle al mueble una película de polvo suficiente, y el espesor deseado según la calibración del equipo, para recubrir toda su superficie de manera pareja y total.

Posteriormente pasa a un horno de curado en donde la pintura se funde y fija al metal, logrando con esto una adherencia y resistencia muy altas. Este tipo de proceso de pintura ofrece excelentes resultados en términos de acabado y sello hermético. En la industria manufacturera se encuentra una amplia aplicación, de hecho, desde un punto de vista cualitativo, es más fácil de aplicar, y desde un punto de vista ecológico, no crea ningún problema para los operadores y el medio ambiente.

El proceso de pintura electrostática se implementó en el año de 1996 en el Centro de Producción de la ESPE sede Latacunga, sin embargo no está completo en todas sus fases.

En la actualidad el Centro de Producción de la Espe sede Latacunga no cuenta con ningún sistema de recolección de las partículas de pintura y por lo tanto se emiten al ambiente, esto le representa a la empresa un alto costo de producción por el desperdicio de material. Cabe recalcar que este tipo de pintura es reutilizable en un gran porcentaje. Otro gran problema es la salud ocupacional de los trabajadores ya que ellos respiran este material particulado que se acumula en gran medida en el ambiente de trabajo produciéndoles a corto o largo plazo enfermedades respiratorias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales de los cuales están hechas las partes de la cabina se detallan a continuación:

Tabla 1 Materiales de construcción de la estructura metálica

PARTE	TIPO	MATERIALES	CARACTERÍSTICAS
Parantes y Vigas	Perfil en L	Acero al carbono ASTM A-36	El acero A36 es una aleación de acero al carbono de propósito general. Tiene una densidad de 7850 kg/m ³ (0.28 lb/in ³). Límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPa (58 ksi).

MATERIALES DE LAS PAREDES Y SOPORTE

La siguiente tabla nos muestra los materiales escogidos para la construcción de las paredes y soporte así también como sus propiedades.

Tabla 2 Materiales de construcción paredes y soporte

PARTE	TIPO	MATERIALES	CARACTERÍSTICAS
Pared posterior, lateral y superior	Planchas de acero e = 0,75 mm	Acero galvanizado	Resistente a la corrosión. Recubrimiento de Zinc. Resistente a la abrasión. Protección integral de los elementos internos. Fácil de pintar.
Soporte de muebles	Tubo cuadrado 20x20x2mm Tubo cuadrado 25x25x20mm	Acero ASTM A-36	El acero A36 es una aleación de acero al carbono de propósito general. Tiene una densidad de 7850 kg/m ³ (0.28 lb/in ³). Límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPa (58 ksi).
Pernos de sujeción	Pernos de 1/4"x 5/8" Pernos de 3/8"x 1 1/4"		
Elementos de sujeción	Arandelas planas y de presión		

Software utilizado:

Los datos se obtuvieron por medio de la simulación del problema planteado mediante paquetes computacionales especiales. Uno de ellos (ANSYS FLUENT version 12.1) utiliza la teoría de volúmenes finitos. El otro programa utilizado fue FLOWIZARD versión 2.0.4., con los cuales se cotejaron los datos obtenidos.

Método de volúmenes finitos.

El método de volúmenes finitos es un método numérico que para discretizar las ecuaciones de un problema, subdivide el dominio del problema en celdas y escribe las ecuaciones en forma de integrales en estas celdas. Al representar y evaluar las ecuaciones diferenciales parciales en forma de ecuaciones algebraicas, los valores son calculados en lugares discretos en una geometría mallada. Un volumen finito se refiere a un pequeño volumen bordeando cada nodo en una malla. En este método las integrales de volumen en una ecuación diferencial parcial que contienen un término de divergencia son convertidas en integrales de superficie, usando el teorema de divergencia. Estos términos entonces son evaluados como flujos en las superficies

de cada volumen finito. En este método conservador se considera que el flujo que entra en un volumen dado es idéntico al flujo de salida del volumen adyacente.

Definition of control volumes

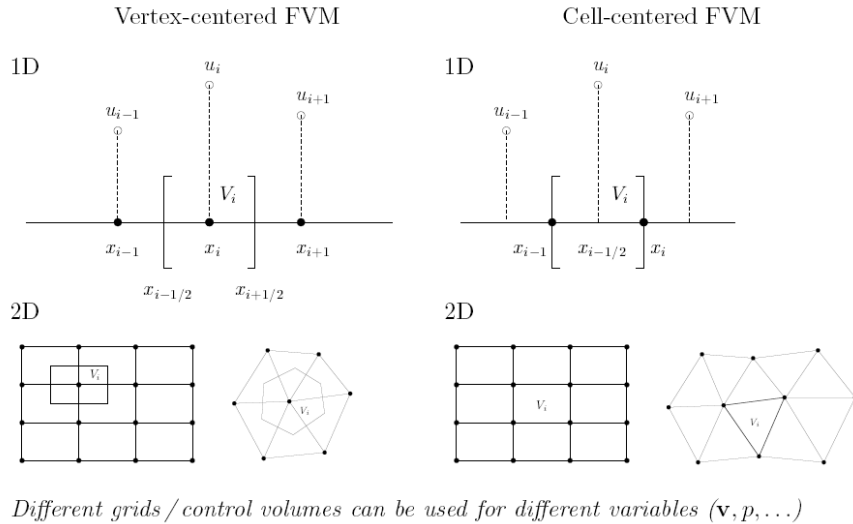


Figura 1 Definición de los volúmenes de control

Metodología de resolución

La metodología básica del método de volúmenes finitos es la siguiente:

1. Dividir el dominio en volúmenes de control.

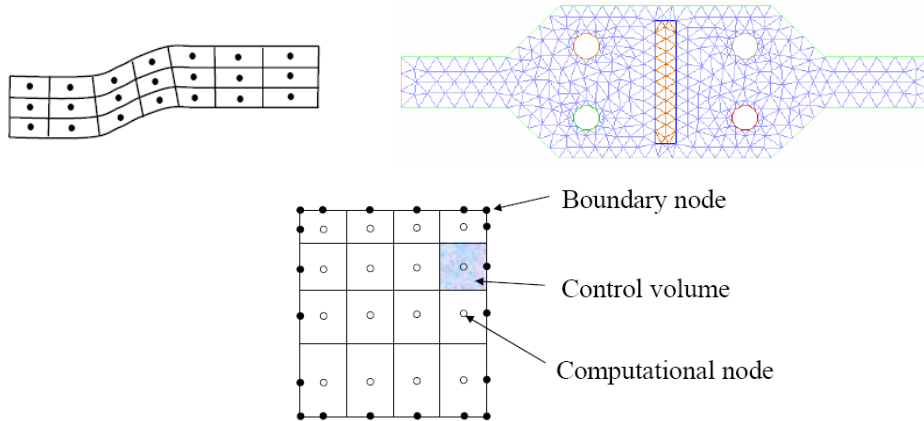


Figura 2 Dominios divididos

2. Integrar la ecuación diferencial sobre el volumen de control y aplicar el teorema de divergencia.
3. Para evaluar los términos derivativos, se necesitan los valores de las caras de los volúmenes de control, por lo que hay que asumir acerca de como varía el valor.
4. El resultado es un grupo de ecuaciones algebraicas lineales, una por cada volumen de control.
5. Se resuelve simultáneamente o iterativamente.

Proceso de solución de ANSYS FLUENT con el solucionador basado en la presión (Pressure-Based Solver)

Se consideran ecuaciones en un estado constante de continuidad y momento en forma integral como sigue:

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p \mathbf{I} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde \mathbf{I} es la matriz identidad, $\vec{\tau}$ es el tensor de esfuerzo, y \vec{F} es el vector fuerza.

El solucionador basado en la presión usa un algoritmo donde las ecuaciones son resueltas secuencialmente, cada variable (u, v, w, p, T, k, ϵ , etc) resuelta una después de otra. Debido a que las ecuaciones que gobiernan el modelo no son lineales y acopladas, los saltos en la solución deben ser llevados iterativamente para obtener una solución numérica convergida.

Cada iteración consiste en los pasos enumerados a continuación:

1. Actualizar las propiedades del fluido (densidad, viscosidad, calor específico, etc.) incluida la viscosidad turbulenta (difusividad) basadas en la solución actual.
2. Resolver las ecuaciones de momento, una después de otra, usando los valores recientemente actualizados de la presión y los flujos másicos de cara.
3. Resolver la ecuación de corrección de la presión usando los valores recientes obtenidos del campo de velocidad y de flujo másico.
4. Corregir los flujos másicos de cara, presión, y campo de velocidad usando la corrección de presión obtenida en el paso 3.
5. Resolver las ecuaciones para escalares adicionales, si hay alguno, tales como cantidades de turbulencia, energía, especies, intensidad de radiación usando los valores actuales de las variables solución.
6. Actualizar los términos de origen de las iteraciones debido a diferentes fases si las hay.
7. Confirmar la convergencia de las ecuaciones.

TURBULENCIA

Un flujo turbulento está caracterizado por fluctuaciones de la velocidad en todas las direcciones y tiene un infinito número de grados de libertad. Resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo turbulento es imposible porque las ecuaciones son elípticas, no lineales, acopladas (presión-velocidad, temperatura-velocidad), el flujo es tridimensional, caótico, difusivo, disipador e intermitente. La característica más importante de un flujo turbulento es el número infinito de escalas o grados de libertad por lo que una resolución numérica completa del flujo requiere la construcción de una malla con un número de nodos que es proporcional a $Re^{9/4}$.

Para resolver el problema una de las soluciones es reducir el número de escalas de infinito a 1 o 2, al usar la descomposición de Reynolds. Esta descomposición llevará a un sistema de

ecuaciones que gobiernen el campo promedio del flujo. Las nuevas ecuaciones serán exactas para este campo no para el campo exacto del flujo turbulento. Un campo promedio del flujo significa que cualquier propiedad se vuelve constante en el tiempo. El resultado de usar la descomposición de Reynolds en las ecuaciones de Navier-Stokes es conocido como RANS o Reynolds Averaged Navier Stokes Equations.

Modelo estándar de turbulencia $k - \epsilon$

Los más simple de los “modelos completos” de turbulencia son los modelos de 2 ecuaciones en los que la solución de dos ecuaciones de transporte separadas permiten determinar la velocidad de turbulencia y la escalas de longitud independientemente. El modelo estándar $k - \epsilon$ usado en ANSYS FLUENT es una herramienta muy útil en la ingeniería práctica desde que fue propuesto por Launder y Spalding. Sus ventajas como su robustez, economía (uso de memoria, tiempo=), y su precisión razonable para un amplio rango de flujos turbulentos, le han dado un puesto en el análisis de flujos industriales y las simulaciones de transferencia de calor. Este es un modelo semi-empírico, y la derivación de las ecuaciones del modelo se basa en las consideraciones fenomenológicas y empíricas.

Al conocerse las fortalezas y debilidades del método estándar, se han realizados mejoras para mejorar el rendimiento. Dos de esas variantes disponibles en ANSYS FLUENT son el RNG $k - \epsilon$ model y Realizable $k - \epsilon$ model.

El modelo $k - \epsilon$ estándar se basa en ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ϵ). El modelo de la ecuación de transporte para k es deducido de una ecuación exacta, mientras que el modelo de la ecuación de transporte para ϵ fue obtenido usando razonamiento físico.

En la deducción de este modelo se asume que el flujo es completamente turbulento, y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables.

La energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ϵ) son obtenidos de las siguientes ecuaciones de transporte:

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

y

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

G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes representativos de velocidad. G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad o sustentación hidráulica. Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en una turbulencia compresible a la razón de disipación promedio. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes. σ_k y σ_ϵ son los números de Prandtl turbulentos para $k - \epsilon$ respectivamente. S_k y S_ϵ son términos definidos por el usuario.

La viscosidad turbulenta (Eddy viscosity) μ_t , se calcula combinando k y ϵ como sigue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{Ec. (5)}$$

donde C_μ es una constante

Las constantes $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , y σ_ϵ tienen los valores experimentales default siguientes:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

Estos valores fueron determinados por experimentos con aire y agua para flujos turbulentos fundamentales cortantes incluidos flujos cortantes homogéneos. Estos fueron encontrados para trabajar bastante bien con un amplio rango de flujos limitados por paredes y flujos libres de cortante.

ECUACIÓN DE BERNOULLI¹

La ecuación de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido bajo condiciones variantes y tiene la forma siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ec. (6)}$$

En la ecuación de Bernoulli intervienen los parámetros siguientes:

- P : Es la presión estática a la que está sometido el fluido, debida a las moléculas que lo rodean
- ρ : Densidad del fluido.
- v : Velocidad de flujo del fluido.
- g : Valor de la aceleración de la gravedad ($9,798 \frac{m}{s^2}$, a la altura de Latacunga).
- Z : Altura sobre un nivel de referencia.

Aplicabilidad

Para llegar a la ecuación de Bernoulli se han de hacer ciertas suposiciones que nos limitan el nivel de aplicabilidad:

- El fluido se mueve en un régimen estacionario, o sea, la velocidad del flujo en un punto no varía con el tiempo.
- Se desprecia la viscosidad del fluido (que es una fuerza de rozamiento interna).
- Se considera que el líquido está bajo la acción del campo gravitatorio únicamente.

CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD²

El funcionamiento de un ventilador depende de la densidad del gas que esté manejando. Así, todos los ventiladores están catalogados en una condición estándar definida como: el aire a 70°F, a nivel del mar, con una densidad del gas de 0.075 lb/ft^3 a una presión barométrica de 29.92 in Hg. (pulgadas de mercurio). En cualquier otra condición, los HP de potencia requeridos por el ventilador y su habilidad para desarrollar presión variarán. Por lo tanto, cuando la densidad del gas no es la estándar de 0.075 lb/ft^3 , se deben aplicar factores de corrección a los valores de catalogo con el propósito de seleccionar el ventilador correcto, el motor, y la transmisión. Se utilizó la siguiente fórmula de corrección:

¹ Robert L. Mott, Mecánica de Fluidos. Prentice Hall.

² H.C. Metcalse, Química Moderna. Página 204

$$\rho' = \rho * \frac{P'}{P} * \frac{T}{T'} \quad \text{Ec. (7)}$$

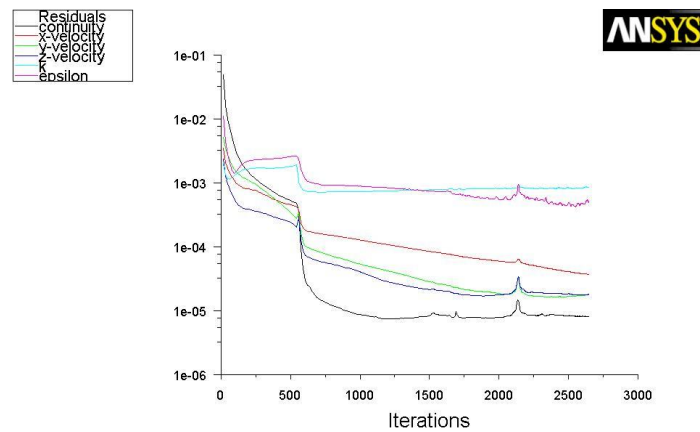
Donde las variables prima (') son a las condiciones buscadas y las otras variables son a condiciones normales.

RESULTADOS

Resultados del análisis de la dinámica del fluido con Ansys Fluent

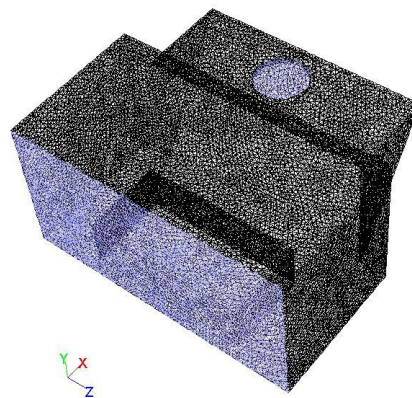
Cabina de pintura y cuarto de succión (Sistema completo) con el mueble de mayores dimensiones (2m*1m*0.6m) producido en el Centro de Producción.

Malla con 249004 elementos



Scaled Residuals Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 3 Residuales con 249004 elementos



Mesh Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4 Malla de 249004 elementos

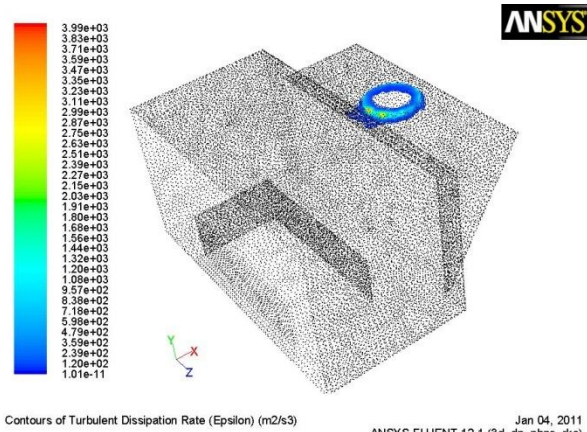


Figura 5 Contornos de razón de disipación de turbulencia con 249004 elementos

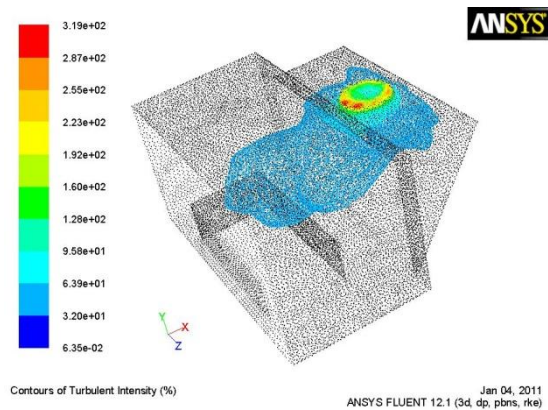


Figura 6 Contornos de intensidad de turbulencia con 249004 elementos

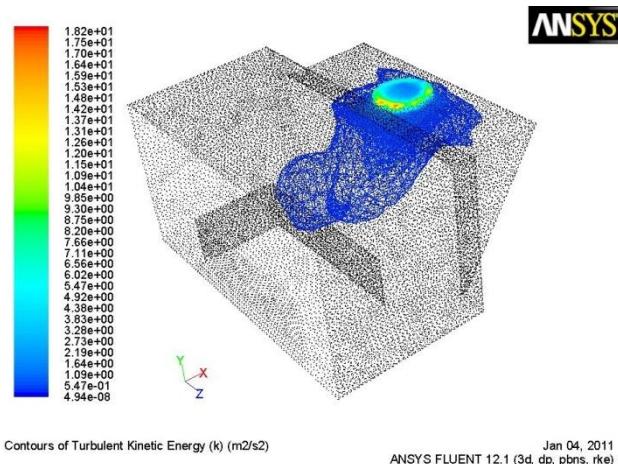
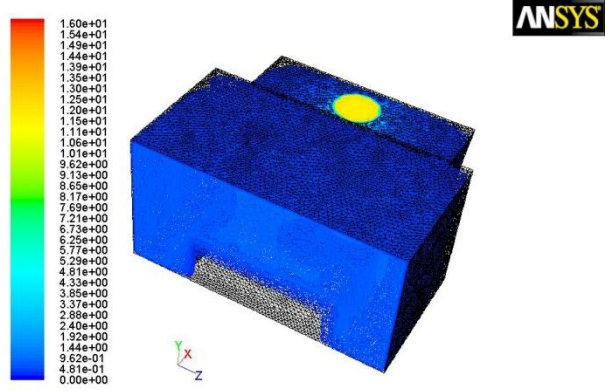


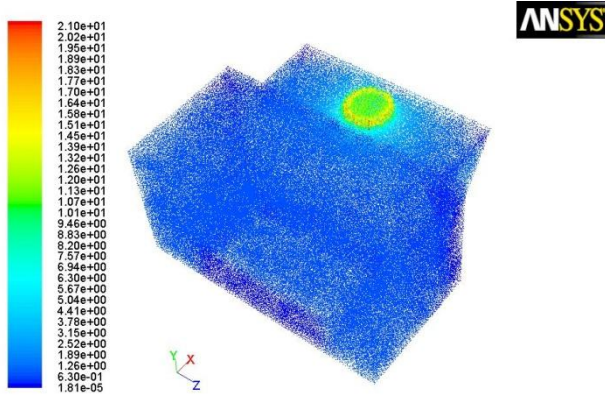
Figura 7 Contornos de energía cinética de la turbulencia con 249004 elementos



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

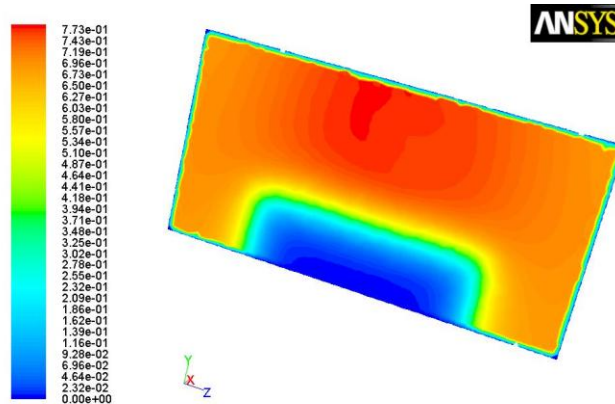
Figura 8 Contornos de velocidad con 249004 elementos



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 9 Vectores de velocidad con 249004 elementos

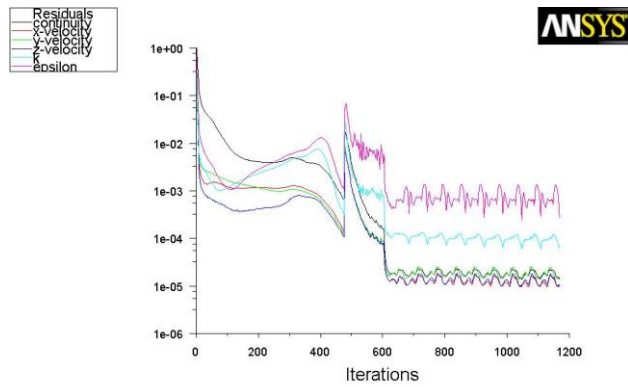


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 10 Contornos de velocidad en la cara frontal con 249004 elementos

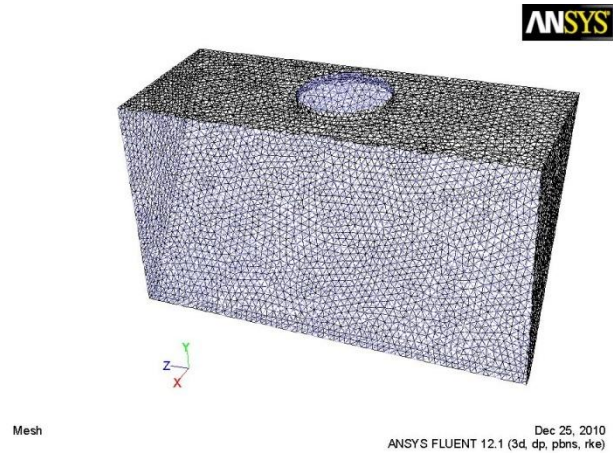
Cuarto de succión con Malla con 92979 elementos



Scaled Residuals

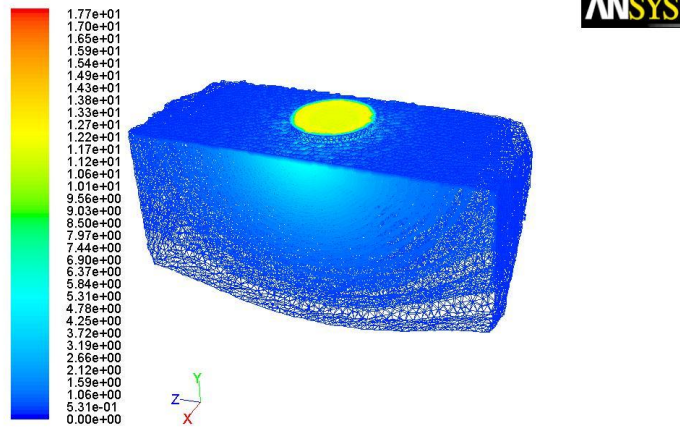
Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 11 Residuales del análisis del cuarto de succión



Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 12 Malla del análisis del cuarto de succión



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 13 Contornos de velocidad del análisis del cuarto de succión

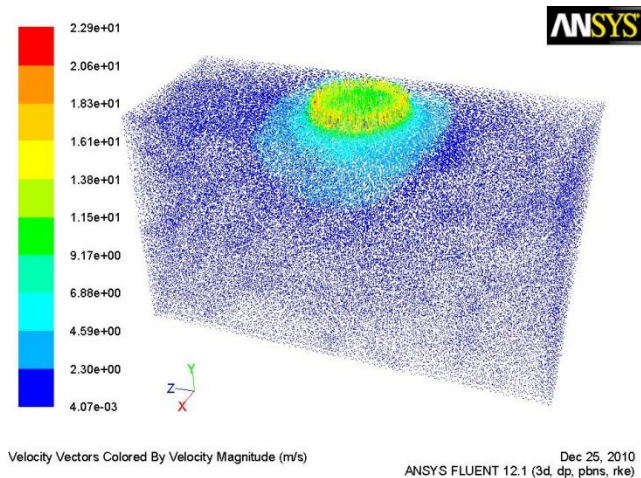


Figura 14 Vectores de velocidad del análisis del cuarto de succión

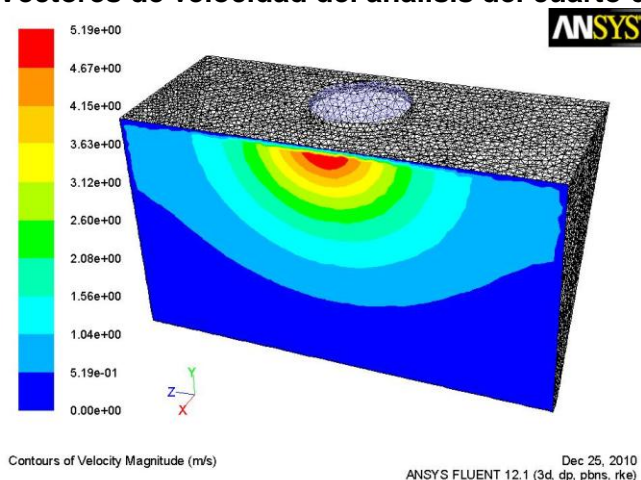


Figura 15 Contornos de velocidad en el panel de filtros del análisis del cuarto de succión

Análisis del flujo de partículas de pintura en polvo

El análisis de flujo de partículas es altamente complejo ya que se trata de un proceso manual, además existe la fuerza de atracción electromagnética que tienen las partículas por lo que su movimiento es muy difícil de predecir, por lo que este análisis se centrará en algunas posiciones posibles para realizar el proceso de pintado y de esta manera observar el comportamiento del mismo y además cómo se comporta el sistema de extracción.

Las características de la pintura electrostática³ son las siguientes:

Densidad: 1,3-1,8 g/cm³

Diámetro de la partícula: 10-300 µm

Espesor de película: para uso normal 2 a 4 mils (50 –100 micrones) Para exposición a condiciones severas son factibles espesores de película de 5-6 mils (125-150 micrones)

Cubrimiento teórico: (aplicación 100%) 12,5 m²/kg a 50 micrones de espesor con gravedad específica de 1,6

Granulometría: 98% menor de 90 micrones.

Almacenamiento: 12 meses a 25 °C y de 50% humedad relativa.

³ Hojas Técnicas, Pinturas en polvo, WESCO S.A.

Proceso de pintado desde un costado del mueble con un ángulo de inclinación de la pistola de 60° aproximadamente.

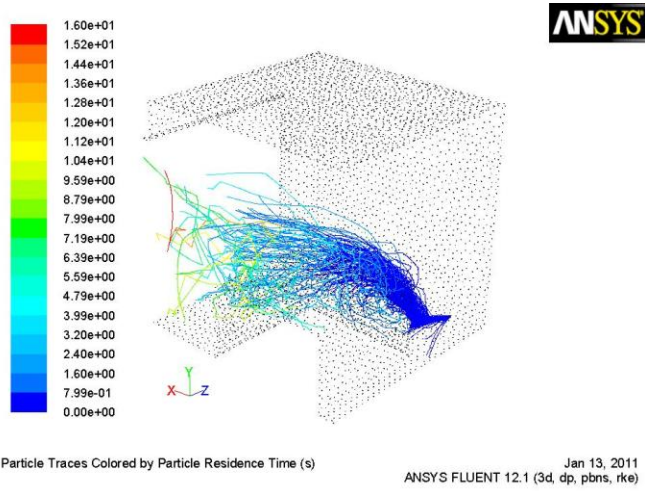


Figura 16 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 -vista 1)

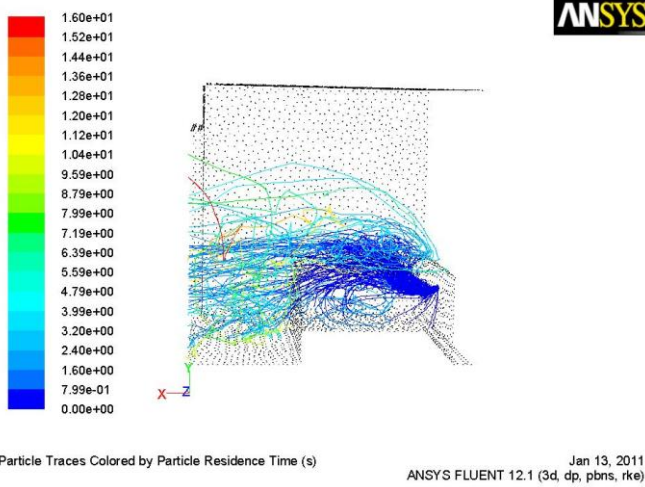


Figura 17 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 -vista 2)

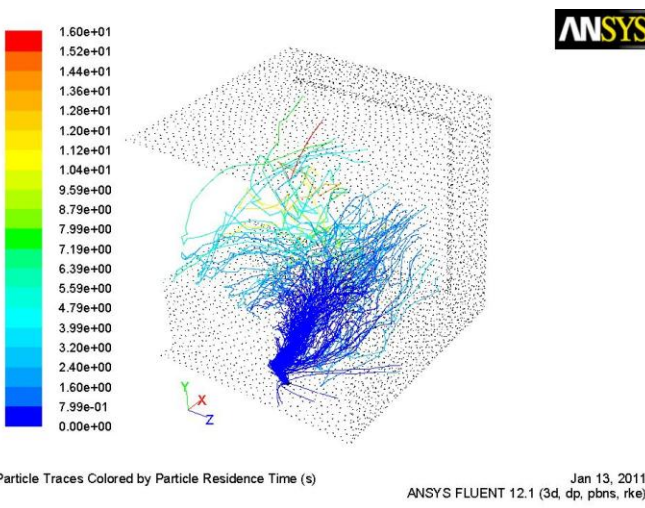


Figura 18 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 -vista 3)

Tabla 3 Análisis de las velocidades en la cabina

ANÁLISIS CABINA COMPLETA EN 3D										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Nº nodos	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Pin (m/s)	Vm Pin (m/s)	Observaciones
Ansys Fluent	1	Tetraedro	0,25	7212	1628	12,4	18,5	0,771	0,590	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Ansys Fluent	2	Tetraedro	0,08	64883	13457	14,2	18,5	0,769	0,578	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Ansys Fluent	3	Tetraedro	0,05	186550	37390	17,2	22,1	0,773	0,590	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Ansys Fluent	4	Tetraedro	0,04	249004	49601	16	21	0,773	0,586	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Flowizard	5	Tetraedro	0,25	7212	1628	17,87	11,83	0,772	0,581	k-e/NB/SOU
Flowizard	6	Tetraedro	0,08	64883	13457	18,42	11,83	0,764	0,579	k-e/NB/SOU
Flowizard	7	Tetraedro	0,05	186550	37390	21,74	11,83	0,771	0,583	k-e/NB/SOU
Flowizard	8	Tetraedro	0,04	249004	49601	23,1	11,83	0,776	0,585	k-e/NB/SOU
Ansys Fluent	9	Tetraedro (GAMBIT)	0,06	111699	21589	13,8	17,9	0,766	0,579	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Flowizard	10	Tetraedro (GAMBIT)	0,06	111699	21589	18,01	11,83	0,761	0,578	k-e/NB/SOU

Tabla 4 Análisis de la cabina completa

ANÁLISIS CABINA COMPLETA MUEBLE EN POSICIÓN VERTICAL										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Nº nodos	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Pin (m/s)	Vm Pin (m/s)	Observaciones
Ansys Fluent	1	Tetraedro	0.08	78395	15250	14,1	18,3	0,57	0,476	PBS/k-e/L/FOU-SOU

Tabla 5 Análisis de las velocidades en el cuarto de succión

ANÁLISIS CUARTO DE SUCCIÓN (SECCIÓN DE FILTROS Y RECOLECCIÓN DE POLVO) EN 3D										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Nº nodos	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Pin (m/s)	Vm Pin (m/s)	Observaciones
Ansys Fluent	1	Tetraedro	0,04	92979	19107	17,7	22,9	5,19	0,828	PBS/k-e/L/FOU-SOU (Vfiltros)
Flowizard	2	Tetraedro	0,04	92979	19107	20,856	11,83	5,309	0,853	k-e/NB/SOU

Tabla 6 Diferencias en los análisis

Nº Análisis	Intervalo	Δ de e (veces)	Δ de e (# de dif.)	Δ de Vec (m/s)	Δ de V (m/s)
1	I1-I2	9,0	57671	0	1,8
2	I2-I3	2,9	121667	3,6	3
3	I3-I4	1,3	62454	-1,1	-1,2
4	I1-I2	9,0	57671	0	0,55
5	I2-I3	2,9	121667	0	3,32
6	I3-I4	1,3	62454	0	1,36

Tabla 7 Códigos utilizados

CÓDIGO	
PBS	Pressure based Solver
FOU	First Order Upwind
SOU	Second Order Upwind
L	Least Square Cell Based Gradient Eval.
NB	Node based Gradient Evaluation
k-e	K-epsilon turbulent viscous model

Tabla 8 Condiciones de frontera utilizadas

Condiciones de Frontera	
Pressure inlet	in
Velocity inlet (FLUENT)	out (V-)
Velocity outlet (FLOWIZARD)	out (V+)

Figura 19 Gráfica de velocidad media de cara vs N° elementos (Flowizard)

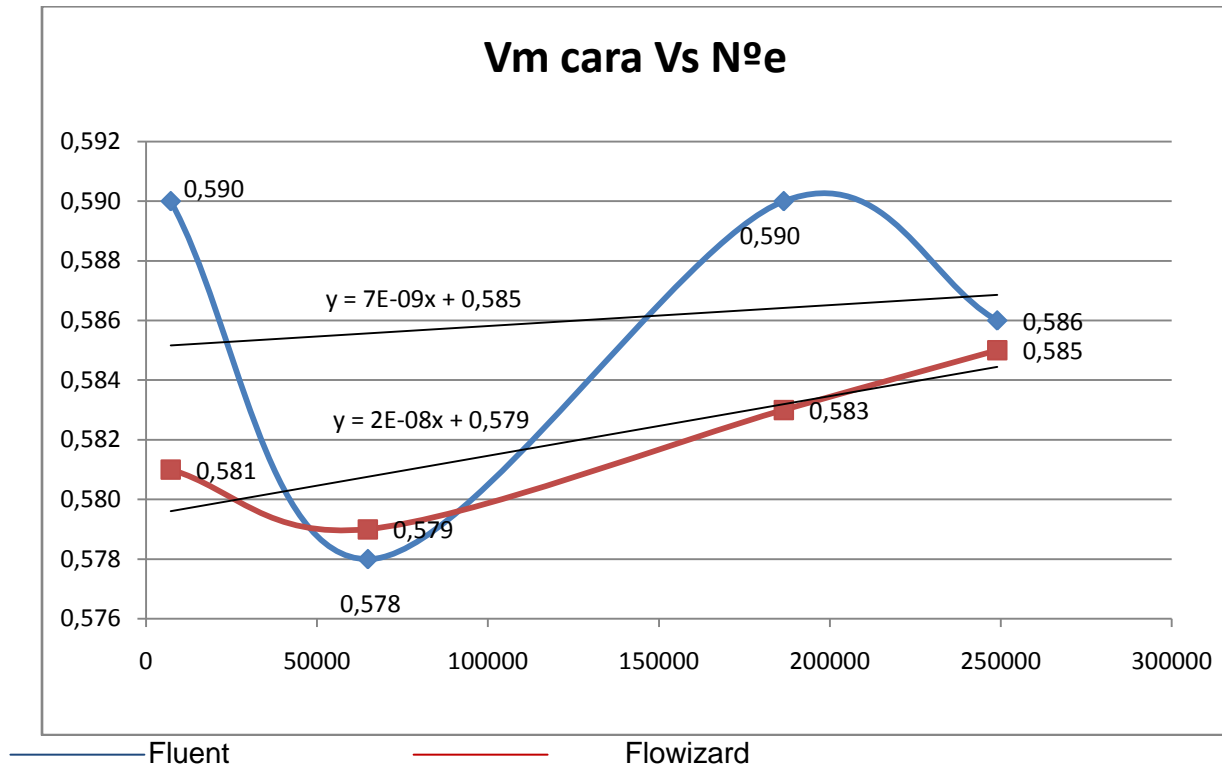


Figura 10 Gráfica comparativa de velocidad media de cara vs N° elementos de ambos programas

PRUEBAS

Esta prueba se realizó sin la presencia de ningún mueble metálico dentro de la cabina, esto nos aseguró una medida exacta del porcentaje de pintura en polvo que se recolectó dentro del sistema.

Se siguieron los siguientes pasos:

- Pesarse 4 libras de pintura en polvo mediante una balanza de apreciación igual a 0,1 lb.
- Se procedió a cargar el equipo electrostático con este material.
- Se encendió el ventilador y se roció la pintura dentro de la cabina simulando la operación de pintado.
- Luego de esto se procedió a extraer las partículas de pintura de los filtros y malla pre-filtrante.
- Se repiten todos los pasos anteriores para realizar otra prueba con un peso de 2 lb.

Resultados obtenidos

Luego de haber realizado las pruebas se realizaron las mediciones respectivas encontrando lo siguiente:

Tabla 9 Resultados de la prueba

Prueba N°	Lectura inicial (lb)	Lectura final (lb)	Porcentaje de recolección (%)
1	4	2.4	60
2	2	1.5	75
Promedio de recolección			67.5

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SISTEMA

El dispositivo utilizado para medir la velocidad del aire dentro de la cabina y el cuarto de succión es un anemómetro electrónico con las siguientes características:

Tabla 10 Especificaciones del anemómetro

Unidad	Rango	Resolución	Mínima medida	Precisión
m/s	0-30	0.1	0.1	±5%
ft/min	0-5860	19	39	
Km/h	0-90	0.3	0.3	
Mph	0-65	0.2	0.2	

MEDICIÓN EN LA BOCA DE ENTRADA DEL VENTILADOR

El primer paso es la medición de la velocidad del aire en la boca de succión para comprobar que exista una correcta calibración del ventilador y que corresponda con los valores de la ficha técnica del mismo como sigue a continuación:

Tabla 11 Tabla comparativa de las velocidades medidas y calculadas de la boca de entrada del ventilador

Descripción	Valor	Error Aproximado Valor promedio
Valor teórico de la ficha técnica	11.83 m/s	-
Valor de Ansys fluent en la periferia	4.37-8.28 m/s	$(7-6.33)/6.33 * 100 = 10.58\%$
Valor medido de la periferia	6-8 m/s	
Valor de Ansys Fluent en el centro	10.6-11.8m/s	$(11.75-11.2)/11.2 * 100 = 4.91\%$
Valor medido en el centro	11-12.5 m/s	

MEDICIÓN EN LA CARA ABIERTA DE LA CABINA

Los datos que se pudieron obtener en la medición de la entrada de la cabina son los siguientes:

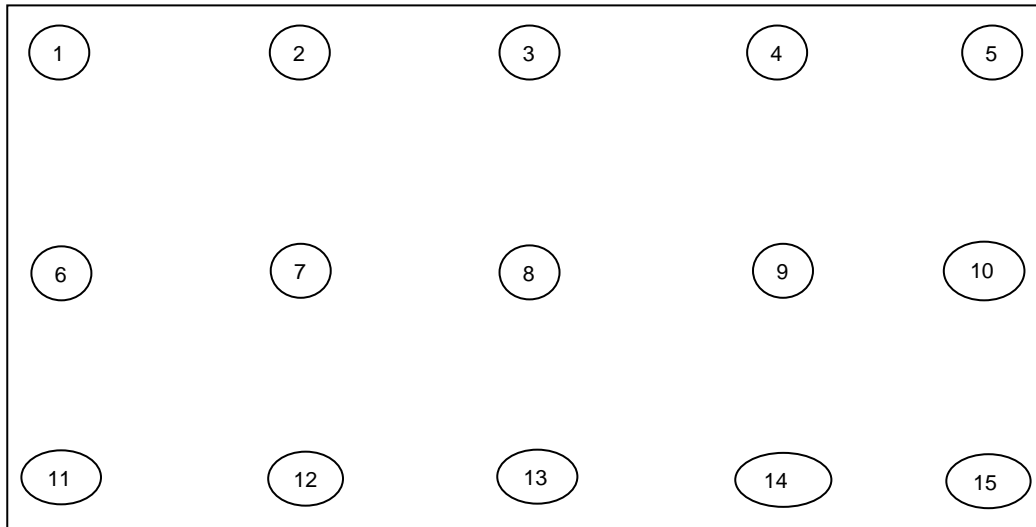


Tabla 12 Mediciones de las velocidades del aire en la entrada de la cabina

		Mediciones (m/s)			Promedio
		Nº1	Nº2	Nº3	
Posiciones	1	0,1	0,1	0	0,07
	2	0	0	0	0,00
	3	0,1	0,2	0,1	0,13
	4	0	0,1	0,1	0,07
	5	0	0,1	0	0,03
	6	3,1	3,3	3,5	3,30
	7	0	0	0	0,00
	8	0	0	0	0,00
	9	0	0	0	0,00
	10	3,7	3,7	3,7	3,70
	11	0,1	0,1	0,2	0,13
	12	0	0	0	0,00
	13	0	0	0	0,00
	14	0	0	0	0,00
	15	0,1	0,2	0,1	0,13
Promedio total				0,50	

Valor teórico = 0.5855 m/s que es el promedio de los valores de Ansys Fluent (0.586 m/s) y Flowizard (0.585 m/s) con la malla de mejor calidad.

$$\%Error = \frac{0.5 - 0.5855}{0.5855} * 100 = 14.6\%$$

MEDICIÓN EN LA ENTRADA DEL CUARTO DE SUCCIÓN

Los resultados de las mediciones en la entrada del cuarto de succión son las siguientes:

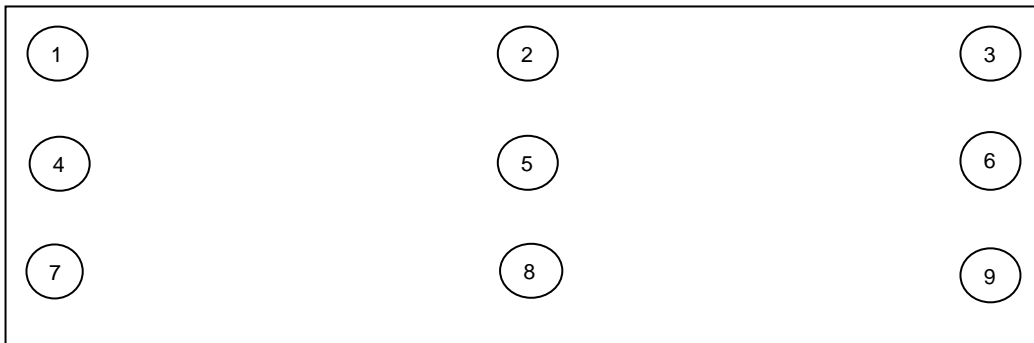


Tabla 13 Mediciones de las velocidades del aire en la entrada del cuarto de succión

		Mediciones (m/s)			Promedio
		Nº1	Nº2	Nº3	
Posiciones	1	0,8	0,9	0,9	0,867
	2	3,1	3,1	3,3	3,167
	3	0,9	0,9	1	0,933
	4	0,7	0,8	0,8	0,767
	5	1,3	1,1	1,2	1,200
	6	0,8	0,7	0,7	0,733
	7	0,1	0	0	0,033
	8	0,1	0	0	0,033
	9	0	0	0,1	0,033
Promedio total				0,863	

Valor teórico = 0.8405 m/s que es el promedio de los valores de Ansys Fluent (0.828 m/s) y Flowizard (0.853 m/s) con la malla de mejor calidad.

$$\%Error = \frac{0.863 - 0.8405}{0.8405} * 100 = 2.68\%$$

PROYECTO TERMINADO



Figura 20 Cabina completa



Figura 21 Ducto de salida completo

CONCLUSIONES:

1. Al finalizar el proyecto y realizar las pruebas correspondientes de funcionamiento se obtuvo un porcentaje de recolección promedio del 68%, valor que nos permite decir que el resultado es sumamente satisfactorio ya que el proceso de recolección se lo realiza manualmente.
2. Debido a factores como: facilidad de adquisición, costo, rendimiento, facilidad de montaje e instalación, se utilizó un ventilador de tipo centrífugo con álabes tipo Airfoil.
3. Los paquetes computacionales especializados en Mecánica de fluidos que fueron utilizados en la realización de este proyecto, brindaron buenos resultados, cercanos al funcionamiento real del equipo.
4. Mediante el análisis computacional realizado en los 2 programas se obtuvo una velocidad promedio en la cara de 0,5855 m/s. Según las pruebas realizadas de medición de velocidad mediante un anemómetro, se obtuvo un valor promedio de 0,50 m/s, lo que nos permite encontrar un error porcentual del 14.6%, el error se justifica debido a que al momento de realizar la medición el aire ingresaba a la cabina en varias direcciones y el caudal en una misma zona no permanecía constante, lo que hacía sumamente difícil obtener datos fijos, además el anemómetro utilizado en la medición tiene una precisión de $\pm 5\%$ que debe tomarse en cuenta en el error final.
5. El valor de la velocidad promedio en la entrada del cuarto de succión mediante el análisis computacional fue de 0,8405 m/s. Mediante las pruebas efectuadas con un anemómetro, la velocidad promedio fue de 0,863 m/s, lo que nos permite encontrar un error porcentual del 2.68%. Como se puede observar el error en este caso es relativamente bajo debido a que el panel de filtros se encuentra en un área más controlada, sin corrientes externas de aire y por lo tanto el caudal permanece uniforme, esto permite que la velocidad se mantenga en todos los puntos.

REFERENCIAS

- **H.H. UHLIG, R.W. REVIE**, Corrosión y Control de Corrosión, J.W. & Sons, Editors. New York, 1985.
- **MOTT L. ROBERT**, Mecánica de Fluidos Aplicada. Traducido del inglés por Carlos R. Cordero P., Homero F. Samaniego. Cuarta ed. México. Editorial Pearson. 1996. p.157.
- **NILS R. GRIMM, ROBERT C. ROSALER**, Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Primera ed. España, McGraw Hill / Interamericana de España S.A., 1996. pp.1, 2, 7, 11, 13, 23, 28, 29, 30,32.
- **H.C. METCALFE, J.E. WILLIAMS, J.F. CASTKA**, Química Moderna. Traducido del inglés por el Dr. Ing. Químico Carlos A. Cruz R., María L. Avalos P. Primera ed. México. Nueva editorial Interamericana. 1984. p.204.
- **JOSEPH E. SHIGLEY, CHARLES R. MISCHKE**, Diseño en ingeniería mecánica. Traducido del inglés por Javier León Cárdenas. Sexta ed. México. McGraw Hill 2002. pp.549, 550,553.
- **RODGER TALBERT**. Paint Technology Handbook. Primera ed. Estados Unidos. CRC Press Taylor and Francis Group. 2008. Pp.153-157.
- **CENGEL A. YUNUS**, Transferencia de calor y masa. Traducido del inglés por José H. Pérez C., Javier E. Brito. Tercera ed. México. McGraw Hill 2007. p.863.
- **LEWIS NITHIARASU**, Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. Primera ed. Editorial Wiley. 2004. pp.38-39.
- **MATTIUSSI**, The FV FD FE Methods as Numerical Methods for Physical Field Problems. Primera ed. Italia. Editorial Nirlav. 2000. pp.255-263.

- **B. E. LAUNDER AND D. B. SPALDING**, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.
- **ROBERT L. MOTT**, Mecánica de fluidos, Traducido del inglés por Javier Enriquez Brito. Sexta ed. México. Pearson. 2006. Pp.167, 522, 572.

CATÁLOGOS Y MANUALES

- **GLOBAL FINISHING SOLUTIONS**, Catálogo Powder Booths, 2006, 6 p.
- **UNITED AIR SPECIALISTS, INC.**, Catálogo Compact media dust collector BDC series. s.f. p.4.
- **GREENHECK**, Catálogo de Ventiladores centrífugos de uso comercial, 2005, pp. 6-7.
- **SOLER & PALAU**, Catálogo Ventiladores Centrífugos serie CM y CMA, 2010. p 51.
- **SOLER & PALAU**, Manual Práctico de Ventilación, s.f. p. 40.
- **GREENHECK**, Manual de instalación, operación y mantenimiento de ventiladores centrífugos industriales, 1999, p.12.
- **NYB**, Engineering letter of the New York Blower Company, "Temperature and altitude affect fan selection", s.f. p.2.
- **ANSYS FLUENT V12.1**, Theory guide, tutorials and user manual.
- **SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE Y CÁLCULO DE CONDUCTOS**, Síntesis anónima de las siguientes referencias: Manual de Aire Acondicionado. Carrier, 1996. Capítulo 2 y 6. Thermal Environmental Engineering. Thomas H. Kuehn, James W. Ramsey, James L. Threlkeld. Ed. Prentice Hall, 1998. Capítulo 18. ASHRAE Handbook. Fundamentals. SI Edition. ASHRAE, 1997. Capítulo 32. Cálculo de conductos de aire. A. Fontanals. Ed. CEAC, 1997. Ventilación Industrial. E. Carnicer. Ed. Paraninfo, 1994. Capítulos 3 y 4. Cálculos en climatización. Ejercicios Resueltas. E. Torrella, R. Cabello, J. Navarro. Ed. AMV, 2002.

PUBLICACIONES

- **ECUADOR, MINISTERIO DE TRABAJO Y EMPLEO**, Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo. s.f. p.5.
- **BAKKER ANDRÉ**, Lecture 5 - Solution Methods: Applied Computational Fluid Dynamics © Fluent Inc.
- **NORMA AWS D1.1**, Structural Welding Code 2006, Especificaciones mínimas de tamaños de soldadura. s.f. p.69.
- **GABRIEL WĘCEL**, Cyclone Fluent tutorial, 2009.