

Implementación de herramientas CFD para la optimización del proceso de secado de lámina en la línea de decapado de la Empresa Acesco y CIA SCA.

Fabio A. Bermejo*, Rafael A. Ramírez** y Jhon Parra***

*Universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia, fbermejo@uan.edu.co ** Universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia, rafael.ramirez@uan.edu.co *** Acesco Cia SCA, jparra@acesco.com

RESUMEN — El presente artículo de investigación aplicada, describe la implementación de herramientas CFD (del inglés *computational fluid dynamics*) para la optimización del proceso de secado de lámina en la planta de Acesco y CIA SCA, en donde resulta difícil experimentar en campo debido a que la ejecución de las corridas representaría un obstáculo para los programas de producción de la industria. Metodológicamente, primero se identificaron las variables más relevantes del proceso, con el fin de establecer los factores y la(s) variable(s) de respuesta que intervienen en el experimento, luego se realizaron las corridas en el software de simulación y finalmente se analizaron los resultados a través de un software estadístico para encontrar el tratamiento que minimiza el contenido de humedad en ambas caras de la lámina. Al final de la simulación se encontró, con la optimización de resultados a través del software estadístico *Statgraphics*, que la combinación de variables óptima corresponde a una velocidad de lámina bajo con un flujo másico de aire medio. Contrario a lo que se puede esperar, un mayor flujo másico de aire caliente, no representa los mejores resultados para el secado.

Palabras clave — Proceso de decapado, secador, soplador, herramientas CFD.

ABSTRACT — This applied research paper describes the implementation of CFD (Computational Fluid Dynamics) tools for optimization of the sheet drying process in the company Acesco and CIA SCA, where it is difficult to perform field experiments because the execution of the runs would represent an obstacle to production schedules in the industry. Methodologically, the most relevant variables to the process were identified in the first place, in order to establish the factors and the response variable(s) involved in the experiment, and then the runs were performed in the simulation software to finally analyze the results using statistical software in order to find the treatment that minimizes the water content on both sides of the sheet. By using the statistical software *Statgraphics*, the results were optimized and it was found that the optimal combination of variables correspond to a low sheet speed with a medium air mass flow. Contrary to the expected, a higher hot air mass flow does not represent the best drying results.

Keywords: Dryer, blower, CFD tools.

I. INTRODUCCIÓN

El mercado del acero se encuentra en pleno proceso de globalización comercial, marcado por una feroz competencia, en donde la fluctuación de su precio y del régimen cambiario están a la orden del día, de este modo, se hace necesario que las empresas sean competitivas, realizando procesos más eficientes e implementando nuevas tecnologías que maximicen su rentabilidad, con el objetivo de garantizar la permanencia y posicionamiento dentro del mercado de este competido producto. ACESCO Y CIA SCA no es ajeno a este fenómeno y busca entrar en

esta nueva tendencia, optimizando a través de herramientas CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) el proceso de secado de lámina en la línea de decapado de su planta de galvanizado.

Actualmente no se conoce la relevancia de cada una de las variables que intervienen en el proceso del secado, ni cómo interactúan entre ellas y se desea dentro del programa de mejoramiento continuo, poder tomar decisiones, encaminadas dentro de un plan de ahorros generales que logren maximizar la rentabilidad de los procesos productivos de la empresa. Por otro lado la experimentación directa no es viable, debido a que los programas de producción no se pueden interrumpir, ya que se verían afectadas las otras etapas dentro de la secuencia en la producción de aceros planos galvanizados. También se podrían incurrir en costos adicionales, como por ejemplo, material mal secado que se corroería más rápidamente, además el motor del ventilador no posee actualmente un sistema variador de velocidad que nos permita experimentar con diferentes flujos y medir el impacto que esto causaría en el secado de la lámina.

Es poca la información encontrada en la literatura abierta relacionada con la simulación computacional de procesos industriales de secado. *Mathioulakis et al (1998)* [1] simuló mediante herramientas CFD, el movimiento del aire dentro de una cámara de secado para frutas. Los perfiles de presión y velocidades del aire fueron encontrados, como la falta de homogeneidad espacial del fluido sobre el producto. Se realizaron ensayos con varias frutas para validar las simulaciones, encontrándose una fuerte correlación entre la velocidad del aire y la velocidad de secado, expresándose esta última como las variaciones respecto al tiempo de la pérdida de peso de la fruta.

La escuela de ingeniería química y molecular de la Universidad de Sydney-Australia (2009) [2] estudió los distintos niveles y escalas de los modelos matemáticos que se pueden aplicar a los secadores de pulverización. Todos los niveles tienen algún valor y el enfoque de una buena mezcla en el secador sugiere la aplicación de escalas (CFD) más gruesas para dar información útil sobre la incidencia de la deposición en la pared de los secadores de formato corto. Enfoques de flujo paralelo dan algunas ideas sobre las tendencias de la cristalinidad y el depósito directamente en la pared de un atomizador. Las herramientas CFD surgen como medio para estudiar los mejores fenómenos de escala analizando el proceso de deposición de la pared con el objetivo de sugerir nuevos diseños para las secadoras.

Kieviet et al (2008) [3], modelo el patrón de flujo de aire en un secador por aspersión. El ángulo del remolino fue cero y el modelado se realizó con un paquete de CFD. Las condiciones de frontera (cantidades de velocidades y turbulencia en la entrada) se obtuvieron a partir de las mediciones con una sonda de hilo caliente. Para validar el modelo CFD, magnitudes de la velocidad del aire fueron

medidas en numerosos lugares de la cámara de secado por aspersión. Para interpretar los resultados, un nuevo enfoque fue desarrollado basado en la interpretación de la tasa de distribución de velocidades en lugar del tiempo promedio de las señales, esto fue necesario por el retroflujo y las grandes fluctuaciones en la velocidad del aire.

Kockel et al (2001) [4], realizó la evaluación de una curva característica de secado de leche en polvo usando herramientas CFD para los tamaños de partículas y condiciones de secado típicas de este tipo de atomizadores. En estudios precedentes se ha demostrado que con diámetros de partícula superior a 2 mm, un modelo lineal es una aproximación aceptable para obstaculizar el secado de este material. Para los diámetros de las partículas de la leche en los atomizadores, los tiempos de secado se pronostican utilizando una curva lineal de caída del orden de 1 segundo en comparación con tiempos de residencia de 20 a 80 segundos en equipos de gran escala.

En referencia a los motores de combustión interna, las herramientas CFD se han implementado para evaluar el desempeño del múltiple de admisión en máquinas turboalimentadas, pero los esfuerzos han estado encaminados al mejoramiento de su eficiencia volumétrica, "Gilkes et al (2006) [5], Seenikannan et al (2008) [6], Campbell et al (2006)" [7]. En motores mixtos el fenómeno ha sido simulado a través de herramientas CFD dentro de la cámara de combustión; iniciando con el encendido piloto de la mezcla, luego con la propagación del frente de llama y finalizando con la evacuación de los gases de escape, "Li et al (1999) [8], Karim et al (2007) [9], Hountalas (2000) [10]".

Esta investigación tiene como objetivo estudiar el proceso de secado de lámina en la línea de decapado de la empresa ACESCO Y CIA SCA. Este fenómeno ha sido simulado mediante el software Cosmosfloworks®, para estudiar en la lámina; la distribución del contenido de humedad en ambas caras, variando factores como la velocidad del ventilador y la velocidad de la hoja metálica a través del secador.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

De acuerdo a la figura 1, el sistema de secado en la línea de decapado consta de los siguientes elementos:

- Motor eléctrico
- Sistema de transmisión por poleas en V
- Ventilador centrífugo
- Ductos de transporte de aire
- Intercambiador de calor de tubos aleteados
- Secador de humedad

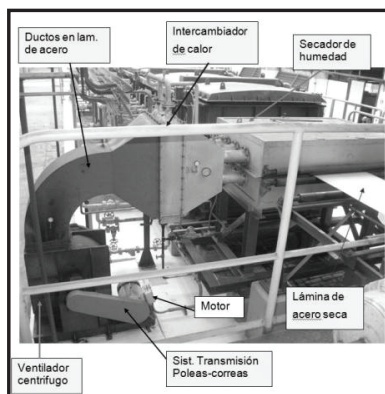


Fig. 1: Componentes del sistema de secado.

El proceso de secado se inicia con el encendido del motor, el cual hace girar el ventilador centrífugo, el cual sopla un caudal de aire a temperatura ambiente, sobre el

serpentin de un intercambiador de calor a través de cual circula vapor de agua saturado a 110 psi y en donde el aire insuflado por el ventilador es calentado por convección, luego es transportado a través de tuberías al secador donde el aire caliente incide directamente sobre la lámina a través de dos juegos de tubos en forma de V, uno superior y el otro inferior (cada juego tiene 3 tubos) cada tubo tiene una ranura, por donde sale el aire caliente que produce la evaporización del residuo de agua que trae la lámina desde su proceso de enjuague. La figura 2 muestra esquemáticamente en un modelo CAD la funcionalidad del proceso.

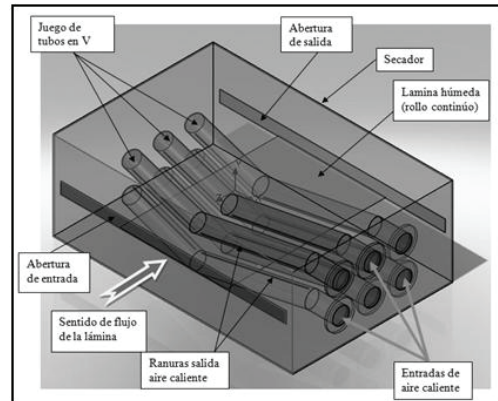


Fig. 2: Modelo CAD del sistema de secado.

III. DESARROLLO DEL MODELO.

El modelo matemático fue desarrollado teniendo en cuenta la dinámica de los fluidos que intervienen en el proceso de secado, como son; el aire que sale de los canales y el agua en la lámina. Las ecuaciones de transporte que rigen la termofluidodinámica de estos fluidos en el proceso, se muestran a continuación.

Ecuaciones de transporte

Para establecer las ecuaciones conservativas, primero se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Fluido newtoniano.
- El volumen de control se encuentra fijo, referenciado en un sistema de coordenadas rectangulares xyz .
- $\rho g_x = 0$, las fuerzas gravitacionales son ignoradas.
- $T_{zz}, T_{xy}, T_{xz}, T_{yz} = 0$, se asume que solo hay fricción entre el fluido y el sólido, es ignorado el mecanismo de tipo molecular. Esta suposición fue verificada por investigadores como Bulaty y Niessner, citados por Winterbone et al (2000) [11], quien encontró que los efectos de las fuerzas internas viscosas son despreciables ($8 \times 10^{-6} \%$ de otros términos).
- $\tau \pi D / A$, Winterbone et al (2000), determinó experimentalmente que el término correspondiente a las fuerzas viscosas en la pared no pueden despreciarse, ya que su magnitud puede llegar a ser más grande que otros términos de la ecuación.
- El flujo a través del secador transfiere calor por convección, radiación y conducción, de los cuales el de mayor contribución en las ecuaciones de

conservación es el mecanismo de convección *Winterbone et al (2000)*, el cual puede ser evaluado;

$$q_i = hA(T_{pared} - T_{gas})$$

- El flujo general considerado tiene velocidad $V(x,y,z)$ y las componentes, V_x, V_y, V_z se reemplazan por u, v y w
- Régimen estacionario, $(\partial/\partial t)=0$

Las ecuaciones de transporte que resuelve el solucionador del software se establecen a continuación:

TABLA I
ECUACIONES DE TRANSPORTE DEL MODELO.

Leyes de conservación	Ecuación
Masa	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$
Cantidad de movimiento	$\frac{\partial(\rho v)u}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)v}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v)w}{\partial z} + \frac{\partial(p)}{\partial x} + \frac{\tau\pi D}{A} = 0$
	$\frac{\partial(\rho v)v}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)v}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v)w}{\partial z} + \frac{\partial(p)}{\partial y} + \frac{\tau\pi D}{A} = 0$
	$\frac{\partial(\rho v)w}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)w}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v)w}{\partial z} + \frac{\partial(p)}{\partial z} + \frac{\tau\pi D}{A} = 0$
Energía	$\frac{\partial(\rho v)h_0}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)h_0}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v)h_0}{\partial z} - \frac{q_x}{A\Delta x} - \frac{q_y}{A\Delta y} - \frac{q_z}{A\Delta z} = 0$

IV. CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera requeridas para alimentar el software de simulación, se establecen a continuación:

- Flujo másico de entrada.

El caudal de aire suministrado por el ventilador se toma de la ficha técnica del ventilador *Chicago Blower Corporation (1995)* [12]. El aire se calienta a 100°C, por lo tanto, su densidad (ρ) a esa temperatura es 0.9458 Kg/m³. El flujo másico total de aire se calcula mediante la ecuación (1), este valor debe dividirse entre seis para establecer el flujo másico individual por tubo.

$$\dot{m} = j \quad (1)$$

En la simulación del proceso se consideran tres flujos de entrada, los cuales dependen de las rpm del ventilador. El ventilador es Modelo *Chicago Blower SQA 22-1/4, clase 3, presión estática de 13.8 in H₂O*.

TABLA II
FLUJOS MÁSCICOS DE ENTRADA

RPM	CFM	FLUJO MÁSCICO (Kg/s)	NIVEL
2640	8234	0,613083	(Alto)
2537	7540	0,560604	(Medio)
2499	6960	0,517478	(Bajo)

- Velocidad de la lámina (V).

Las velocidades de la lámina en el proceso de decapado se toman directamente de los indicadores de velocidad instalados en el proceso, para lo cual se hizo un registro, en donde se especifican entre otros datos, el ancho de lámina, espesor, y temperaturas a la entrada del secador. (Ver Tabla 2).

TABLA III
MEDICIONES DE CAMPO.

Fecha	Hora	Esp. Lámina (mm)	Ancho Bobina (mm)	Vel. línea central (m/min)	Vel. Línea salida (m/min)	Temper. Prom. Entrada Secador (°C)
4-dic-09	09:45 a.m.	2,0	1100	40,8	42,3	77,0
4-dic-09	10:30 a.m.	2,5	1215	54,5	56,7	69,8
9-dic-09	11:40 a.m.	3,25	1220	55,9	57,9	71,0
9-dic-09	03:00 p.m.	3,25	1220	49,6	51,7	67,3
10-dic-09	04:12 p.m.	3,0	1215	60,3	61,6	59,3
Mediciones						
Fecha	Esp. (mm)	Zona	M1 (°C)	M2 (°C)	M3 (°C)	Prom. (°C)
4-dic-09	2,0	Sal. Cubo	85,0	86,0	83,0	84,7
		Ent. Secador	76,0	76,0	79,0	77,0
	Sal. Secador	66,5	71,0	62,0	66,5	
	2,5	Sal. Cubo	75,5	84,0	73,5	77,7
		Ent. Secador	68,5	72,0	69,0	69,8
		Sal. Secador	65,0	62,0	59,5	62,2
9-dic-09	3,25	Sal. Cubo	66,0	86,0	82,0	78,0
		Ent. Secador	78,0	57,0	78,0	71,0
	Sal. Secador					
9-dic-09	3,25	Sal. Cubo	71,0	79,0	78,0	76,0
		Ent. Secador	70,0	65,0	67,0	67,3
	Sal. Secador	58,0	66,0	67,0	63,7	
10-dic-09	3,0	Sal. Cubo	65,0	82,0	80,0	75,7
		Ent. Secador	59,0	58,0	61,0	59,3

Del anterior registro se toman tres velocidades que están dentro del rango registrado en la operación de la línea para la simulación.

TABLA IV
VALORES SELECCIONADOS DE LA VELOCIDAD DE LÁMINA.

Velocidad de la lámina (m/s)	Nivel
1	Alto
0.833	Medio
0.666	Bajo

- Presión de Entrada y Salida en el Secador

Debido a que las aberturas de entrada y salida del secador, por donde transita la lámina se encuentran abiertas a atmósfera, consideramos que el valor de la presión en esos puntos es igual a la presión atmosférica estándar del ambiente, y establecemos su valor en 101325 Pascales.

Las condiciones de frontera para un tratamiento de la simulación son mostradas en la figura 3.

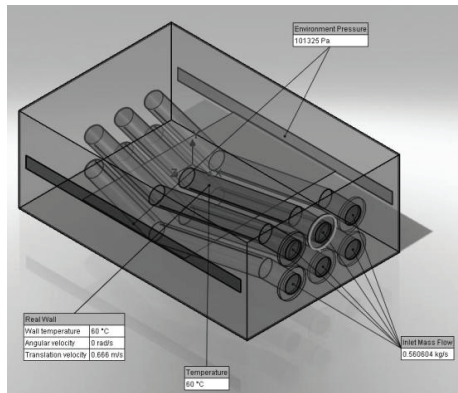


Fig. 3: Condiciones de frontera.

V. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

El diseño más simple del sistema 3^k es el diseño 3^2 , el cual tiene dos factores, cada uno con tres niveles. Las características del experimento y las combinaciones de tratamientos se muestran en las tablas V y VI.

TABLA V
CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.

Número de factores	2
Número de réplicas	1
Número de respuestas	3
Número de corridas / estado del motor	9
Grados de libertad	8

TABLA VI
COMBINACIONES DE TRATAMIENTOS.

Tratamientos	Factor A	Factor B
1	2	2
2	0	0
3	1	2
4	2	1
5	1	0
6	0	2
7	1	1
8	2	0
9	0	1

En total se realizaron 9 corridas, el experimento planteado no contiene elementos probabilísticos en el modelo de la simulación, este tipo de modelos se conoce como determinístico, en el cual la variable de respuesta es única una vez se han estipulado las variables de entrada.

VI. EXPERIMENTACIÓN.

El objetivo del siguiente experimento consiste en determinar qué combinación de factores y niveles producen la menor cantidad de condensado en ambas caras de la lamina, de este modo se analizara el contenido de humedad, con el fin de minimizar la variable de respuesta y encontrar qué tratamiento genera el valor óptimo.

Para el diseño y análisis de experimento se utilizó el software "Statgraphics" donde las corridas fueron generadas aleatoriamente. La tabla VII muestra los resultados obtenidos por la simulación.

TABLA VII
RESULTADOS OBTENIDOS POR LA SIMULACIÓN

Corrida No	PARAMETROS			FCCI (cara Inf.)	FCCS (cara sup.)
	Velocidad Lam. (m/s)	Flujo másico (Kg/s)	Fracción masa condensado (promedio)	Fracción masa condensado (promedio)	
1	1	0.613083	0.08331	0.0915116	
2	0.666	0.517478	0.159357	0.123884	
3	0.833	0.613083	0.258153	0.310697	
4	1	0.560604	0.224755	0.178215	
5	0.833	0.517478	0.260021	0.253002	
6	0.666	0.613083	0.0695383	0.0662968	
7	0.833	0.560604	0.212702	0.20982	
8	1	0.517478	0.212478	0.186937	
9	0.666	0.560604	0.0274421	0.0237071	

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En esta sección se analiza el tratamiento que optimiza las tres variables de respuesta.

- Optimización de múltiples respuestas

Un enfoque útil para la optimización de respuestas múltiples es la técnica de optimización simultánea popularizada por *Derringer* y *Suich* (1980) [13]. Su procedimiento hace uso de las funciones con condición de "deseable".

Múltiples Respuestas

Datos/Variables:

FCCI
FCCS

TABLA VIII

	Mínimo	Máximo
Respuesta	Observado	Observado
FCCI	0.0274	0.26
FCCS	0.0237	0.3107

TABLA IX

	Deseabilidad Baja	Deseabilidad Alta	Meta	Pesos Primero	Pesos Segundo	Impacto
Respuesta	Baja	Alta	Meta	Primero	Segundo	Impacto
FCCI	0.0274	0.26	Minimizar	1.0		3.0
FCCS	0.0237	0.3107	Minimizar	1.0		3.0

TABLA X
ANÁLISIS DE RESPUESTAS MÚLTIPLES

Fila	FCCI	FCCS	Deseabilidad Prevista	Deseabilidad Observada
1	0.0833	0.0915	0.572116	0.761715
2	0.1594	0.1239	0.68443	0.530569
3	0.2581	0.3107	0.200463	0.0
4	0.2247	0.1782	0.519318	0.264697
5	0.26	0.253	0.0	0.0
6	0.0695	0.0663	0.827769	0.835127
7	0.2127	0.2098	0.181725	0.267381
8	0.2125	0.1869	0.247181	0.296798
9	0.0274	0.0237	0.858024	1.0

Este procedimiento ayuda a determinar la combinación de los factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas. Los hace maximizando la función de 'deseabilidad'. Las metas de cada una de las respuestas actualmente están establecidas como:

FCCI - minimizar
FCCS - minimizar

La tabla X, muestra la función de 'deseabilidad' evaluada en cada punto del diseño. Entre los puntos de diseño, la 'deseabilidad' máxima se alcanza en la corrida 9.

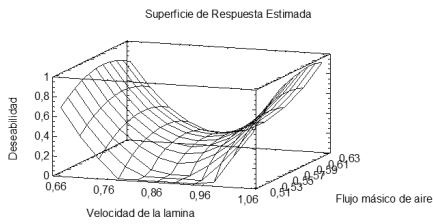


Fig. 4: Superficie de respuesta obtenida.

- Análisis de la variable de respuesta optima

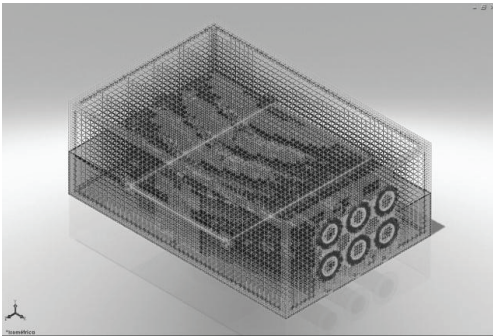


Fig. 5: Mallado final.

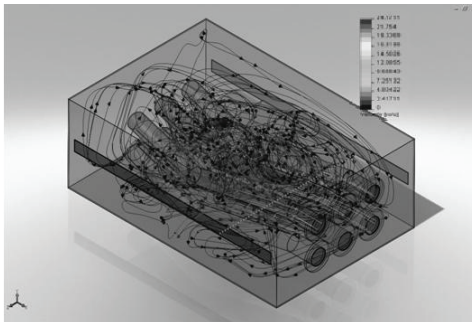


Fig. 6: Perfil de velocidad "líneas de flujo"

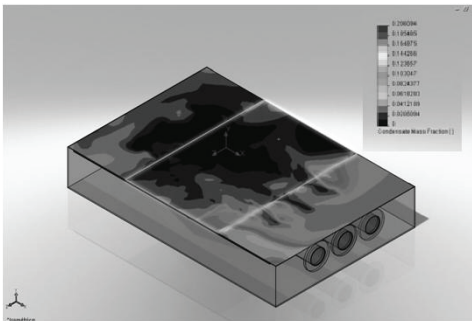


Fig. 7: Perfil fracción de agua condensada

VIII. CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados se puede concluir que la variable más determinante e influyente en el proceso de secado es la velocidad de la lámina. Con la optimización de resultados a través del software estadístico, se comprueba que la combinación de variables óptima corresponde a una

velocidad de lámina bajo con un flujo máscico de aire medio. Contrario a lo que se puede esperar un mayor flujo máscico de aire caliente, no representa los mejores resultados para el secado.

Comparando los valores obtenidos, se observa que la fracción de masa condensada en la cara superior e inferior de la lámina no es igual para las dos caras. La imagen obtenida en la figura 7 para el perfil de la fracción de agua condensada, muestran que en los bordes y en los puntos cercanos a las aberturas del secador, es donde mayor residuo de agua queda, por lo tanto, se debe realizar un rediseño del sistema para que el flujo actué uniformemente sobre ambas caras de la lámina.

La implementación de la tecnología con el software de CFD nos permite una mayor capacidad de análisis, con ahorros significativos en tiempo y costos de experimentación. La utilización de software de análisis estadístico para el diseño del experimento nos permite incorporar la rigurosidad científica a la simulación y validez de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecerle a la Universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia (Atlántico) y la empresa ACESCO y CIA SCA por toda su colaboración y apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Mathioulakis E, Karathanos V. T, Belessiotis. "Simulations of air movement in a dryer by computational fluid dynamics": Application for the drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, Volumen 36, edición 2, pp 183-200. 1998.
- [2] T.A.G. Langrish. "Multi-scale mathematical modeling of spray dryers". *Journal of Food Engineering*, Volumen 30, edición 11, pp 1281-1292. Noviembre de 2006.
- [3] Kieviet F.G, Van Raaij J, P.P.E.A De Moor, P.J.A.M Kerkhof (1997), "Measurement and Modelling of the air flow pattern in a pilot-plant spray dryer". *Chemical Engineering Research and Design*, Volumen 75, edición 3, Marzo de 1997.
- [4] Kockel T.K, T.A.G Langrish. "The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modeling" *Chemical Engineering journal*, volume 84, edición 1. Septiembre de 2001.
- [5] Gilkes O. "Computer simulation of air injection to inlet manifold on turbocharged Engines, Huddersfield University F2006SC3. England. 2006.
- [6] Seenikannan P, Periasamy VM, Nagaraj P, (2008) "A Design Strategy for Volumetric Efficiency Improvement in a Multi-cylinder Stationary Diesel Engine and its Validity under Transient Engine Operation", *American Journal of Applied Sciences* 5 (3): ISSN 1546-9239, 189-196, 2008.
- [7] Campbell A, Hadday J, Zhou Ch. "CFD Analysis of Heat Exchanger and Aftercooler for Diesel Marine Engines" artículo técnico de la ASME # IMECE2006-15982, presentado en Chicago Illinois USA. 2006.
- [8] Li G y Ouellette P, Dumitrescu S, Hill P. "Westport Research Inc, Universidad de British Columbia", "Optimization Study of Pilot-Ignited Natural Gas Direct-Injection in Diesel Engines", artículo técnico de la SAE # 3556. 1999.
- [9] Karim A, Chengke L. "3D-CFD Simulation of Diesel and Dual Fuel Engine Combustion, artículo técnico de la ASME # ICEF2007-1621, presentado en Charleston, South Carolina USA. 2007.
- [10] Hountalas D, Papagiannakis. "Development of a Simulation Model for Direct-Injection, Dual-Fuel, Diesel- Natural Gas Engines" artículo técnico de la SAE # 0286. 2000.
- [11] Winterbone D, Pearson R. *Theory of engine manifold design. Wave action methods for IC engines.* Professional Engineering Publishing. 2000.
- [12] Chicago Blower Corporation. "Desing 36 SISW SQA airflow centrifugal fan". Reference 95-501. 1995.
- [13] Derringer G, R Suich. "Simultaneous Optimization of Several Response Variables", en *Journal of Quality Technology*, vol. 12, pp 214-219. 1999.