

Numerical study of air flow through an injector using CFD techniques

Freddy J. Rojas, Ph.D.¹, Víctor Anicama, Ing.², Celso De La Cruz, Dr.¹, Miguel Cataño, M.Sc.¹, Ivan Loayza, Ing.¹
¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, f Rojas@pucp.edu.pe, celso.delacruz@pucp.edu.pe, mcatano@pucp.edu.pe, iloayza@pucp.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, cope131@hotmail.com

Abstract– The fluid-dynamic behavior of the air flow through the selected injector model 47004 AMF was validated at various conditions to be used as a potato selection system. The injector was designed and manufactured by the Nex Flow company and acquired for this study to meet the necessary requirements for the aforementioned application. The numerical analysis was developed with the commercial software Ansys Workbench 2020 R1 based on the finite volume technique to solve the equations of continuity, conservation of moment, etc. The following were considered: (i) fluid with air with constant density, (ii) stable state, (iii) SST (Shear Stress Transport) turbulence model. The simulation considers an inflow at different flow rates to obtain a trend curve, an operating temperature of 25 ° C and an atmospheric pressure of 1 atm. The results show a similar trend with the results obtained by the experimental tests, in addition to similarity with the supplier's tables, in which we find tables that help us to demonstrate the behavior of the injector. In addition, it is possible to compare the diameter of the flow core at the outlet of the injector, but at different distances, evidencing a similar behavior to that given in the supplier's graphs. It is concluded that the selected injector meets the requirements of the potato selection project.

Keywords - CFD, injector, high pressure air.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.31>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Estudio numérico del flujo de aire a través de un inyector usando técnicas CFD

Numerical study of air flow through an injector using CFD techniques

Freddy J. Rojas, Ph.D.¹, Víctor Anicama, Ing.², Celso De La Cruz, Dr.¹, Miguel Cataño, M.Sc.¹, Ivan Loayza, Ing.¹

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, fjrojas@pucp.edu.pe, celso.delacruz@pucp.edu.pe, mcatano@pucp.edu.pe, iloayza@pucp.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, cope131@hotmail.com

Resumen– Se validó el comportamiento fluidodinámico del flujo de aire a través del inyector seleccionado modelo 47004 AMF a varias condiciones para ser usado como sistema de selección de papas. El inyector fue diseñado y fabricado por la empresa Nex Flow y adquirido para el presente estudio por cumplir con los requerimientos necesarios para la aplicación referida. El análisis numérico se desarrolló con el software comercial Ansys Workbench 2020 R1 basado en la técnica de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de continuidad, conservación de momento, etc. Se consideró: (i) fluido con aire con densidad constante, (ii) estado estable, (iii) modelo de turbulencia SST (Shear Stress Transport). La simulación considera un flujo de entrada a distintos caudales para obtener una curva de tendencia, una temperatura de operación de 25°C y una presión atmosférica de 1 atm. Los resultados validan una similar tendencia con los datos obtenidos por las pruebas experimentales, además de similitud con las tablas del proveedor, en las cuales encontramos tablas que nos sirven para validar el comportamiento del inyector. Además, se logra comparar el diámetro del núcleo del flujo a la salida del inyector, pero a distintas distancias validando un similar comportamiento al entregado en los gráficos del proveedor. Se concluye que el inyector seleccionado cumple con los requerimientos del proyecto de selección de papas.

Palabras clave– CFD, inyector, aire a alta presión.

Abstract– The fluid-dynamic behavior of the air flow through the selected injector model 47004 AMF was validated at various conditions to be used as a potato selection system. The injector was designed and manufactured by the Nex Flow company and acquired for this study to meet the necessary requirements for the aforementioned application. The numerical analysis was developed with the commercial software Ansys Workbench 2020 R1 based on the finite volume technique to solve the equations of continuity, conservation of moment, etc. The following were considered: (i) fluid with air with constant density, (ii) stable state, (iii) SST (Shear Stress Transport) turbulence model. The simulation considers an inflow at different flow rates to obtain a trend curve, an operating temperature of 25 °C and an atmospheric pressure of 1 atm. The results show a similar trend with the results obtained by the experimental tests, in addition to similarity with the supplier's tables, in which we find tables that help us to demonstrate the behavior of the injector. In addition, it is possible to compare the diameter of the flow core at the outlet of the injector, but at different distances, evidencing a similar behavior to that given in the supplier's graphs. It is concluded that

the selected injector meets the requirements of the potato selection project.

Keywords - CFD, injector, high pressure air.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el uso de aire comprimido como fuente de energía está presente en diferentes procesos industriales [1]. Tiene diferentes aplicaciones; por ejemplo, proceso de limpieza, secado, refrigeración, transporte y clasificación. Estudios afirman que el costo relacionado a la producción de aire comprimido representa el 20% del consumo total energía en las empresas [2]. Por lo tanto, existe la iniciativa de hacer más viable el uso de la técnica. Esto radica fundamentalmente en reducir la cantidad de flujo másico de aire requerido.

El inyector de aire Nex Flow™ Air Mag™ es un inyector [3] con un diseño único patentado, para asistir en la dirección de aire comprimido de la línea de suministro, y el aire de los alrededores, a un flujo laminar más agudo con la máxima fuerza por SCFM en el mercado. Esto reduce la energía utilizada por el aire comprimido y los niveles de ruido producido, comparado con jets abiertos y pipas. Aun reemplazando inyectores de aire competitivos puede proporcionar ahorros significativos en costo de energía y niveles de ruido. El inyector está fabricado de fuerte zinc fundido, en una sola pieza, diseño ideal para ambientes difíciles, y de acero inoxidable 316L para aplicaciones en ambientes de procesamiento de alimentos, farmacéuticos y corrosivos. Ver Figura 1.

La simulación del inyector permite entender mejor la fluidodinámica [4], [5] del mismo, obteniéndose valores comparativos cuantitativos con la data del fabricante. El estudio del chorro [6] a la salida del inyector permite obtener contornos de variables del mismo a diferentes regímenes de velocidad [7].

La dinámica de fluidos computacional [4], [8], [9] permite, mediante la resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos, visualizar las distintas variables a la salida del inyector.

El objetivo del presente trabajo es validar un inyector seleccionado con data técnica por el fabricante si la fluidodinámica es apropiada para conseguir ser aplicada en un

Proyecto de selección de papa. Para esta validación se usó CFD y se validó el inyector seleccionado según data técnica del fabricante.

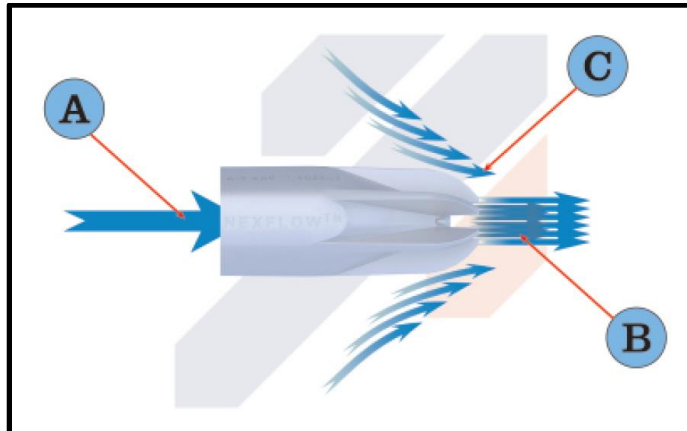


Fig. 1 Inyector modelo 47004 AMF

II. DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La mecánica de fluidos es una rama de la mecánica de los medios continuos, que estudia el comportamiento de los fluidos (gases y líquidos) así como los esfuerzos a que estos están sometidos. La característica principal que define a un fluido es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes, lo cual implica que carezca de forma propia y deba asumir la forma del recipiente que lo contiene.

La mecánica de fluidos asume que los fluidos verifican las leyes de conservación de la masa, cantidad de movimiento, la primera y segunda ley de la termodinámica. Pero probablemente la hipótesis más importante es la de medio continuo. Esta es la hipótesis fundamental de la mecánica de fluidos y establece que el fluido es un material continuo a lo largo del espacio que ocupa, ignorando por tanto su estructura molecular y las discontinuidades asociadas a la misma. Esto permite considerar a las propiedades del fluido (densidad, temperatura, presión, etc.) como funciones continuas. La hipótesis del medio continuo tiene validez si el camino libre medio de las moléculas del fluido es menor a la longitud característica del sistema físico.

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los fluidos se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen del fluido. Haciendo esto se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para llegar a la formulación diferencial de las mismas deben aplicarse diferentes teoremas matemáticos, llegando así a la llamada formulación diferencial no lineal, conocida como ecuaciones de Navier-Stokes (en adelante ecuaciones de N-S). Estas ecuaciones gobiernan el movimiento de la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas, el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en todo tipo de fluidos.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

No se dispone de una solución general para las ecuaciones de N-S [10], y exceptuando ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas, no es posible hallar una solución analítica para problemas ingenieriles. Por ello en general su resolución implica recurrir al análisis numérico mediante mecánica de fluidos computacional (CFD).

Ecuación Diferencial de Conservación de Masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Flujo estacionario y compressible

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Flujo estacionario e incompressible

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Ecuación Diferencial de Conservación de Movimiento

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Por lo tanto, el procedimiento para la validación del uso del inyector seleccionado será el uso de CFD usando como programa Ansys Workbench y siguiendo la metodología de simulación presentados más adelante y realizar pruebas experimentales con el inyector en un banco de ensayos usando aire comprimido a diferentes condiciones de presión. Para estos ensayos se cuenta con instrumentación apropiada para medir flujo volumétrico (SLPM), temperatura (°C) y presión (bar).

A. Definición geométrica

Como paso inicial para la simulación del inyector se determinó que se podría simular correctamente solo considerando la mitad de la geometría, porque se podría aplicar al inyector el concepto de simetría el cual permite dividir al modelo en dos partes iguales. Gracias a esta observación se logra tener un ahorro en tiempo de simulación y en mejorar la calidad de los resultados con una malla mejor estructurada.

Para realizar el modelo 3D se toman medidas de una pieza real y se utiliza un software de diseño que permite tener parametrizados el modelo para ser fácilmente modificado si fuera necesario. (Figura 2).

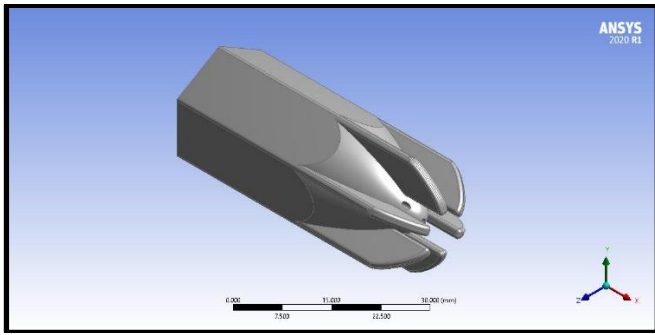


Fig. 2: Muestra sólida modelado en Inventor

Algo importante para un CFD, es entender el concepto del dominio en 3D por donde pasa el fluido, en otras palabras, es lo contrario a tener el sólido de la pieza. Todo software para simulación CFD tiene herramientas de diseño que permiten extraer el interior de una pieza sólida y quedarnos solo con la geometría de nuestro interés (Figura 3).

Finalmente determinamos que lo más importante de esta simulación es el chorro de aire que se formará al pasar por el inyector, por tal razón se crea una nueva geometría que permita afinar el mallado en esa zona. Además, se divide la geometría en dos partes iguales y nos quedamos solo con una, aplicando el criterio de simetría (Figura 4).

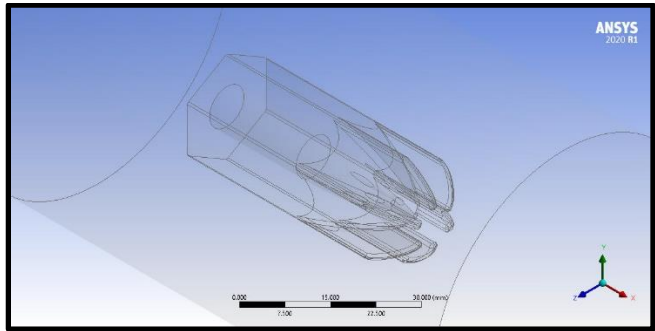


Fig. 3: Muestra tridimensional modelado en Inventor.

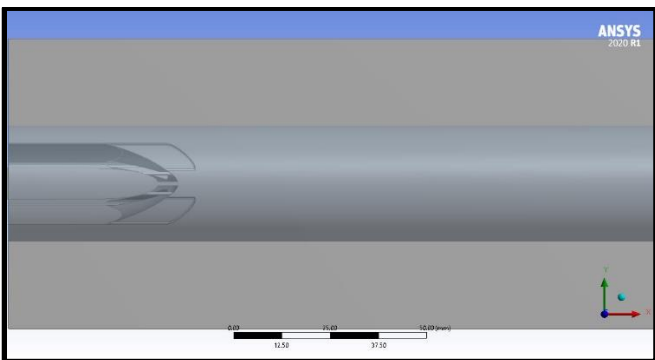


Fig. 4: Muestra modelado en Inventor.

B. Mallado

Toda geometría que va a ser sometida a un análisis CFD genera la necesidad de crear una malla para el objeto de estudio, donde se divide el sólido en varias caras que son convergentes,

con el fin de hacer que el sólido se convierta en una geometría suavizada y sea fácil de trabajar en el estudio que se quiere llevar a cabo. Para esto ANSYS presenta la opción de realizar “Mesh”, donde se crea la malla de acuerdo con los parámetros establecidos en el software, para la geometría diseñada del inyector (Figura 5).

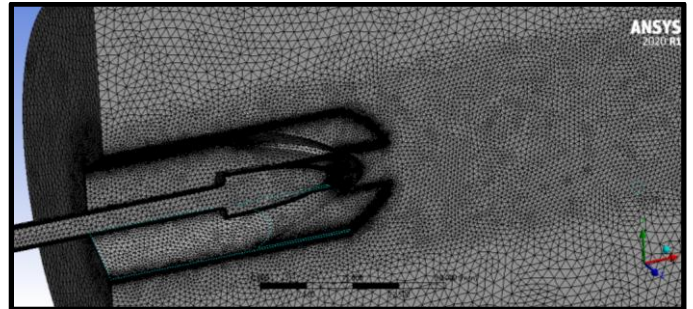


Fig. 5: Enmallado de la muestra

En la tabla 1, se puede observar las consideraciones establecidas para generar la malla de la geometría, considerando una malla especial para el tratamiento de la pared (Inflation) en función de la altura de la primera capa.

TABLA 1:
CARACTERÍSTICAS DEL MALLADO

Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Element Size	1.5 mm
Defeature Size	0.1 mm
Curvature Min Size	0.1 mm
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	0.001 mm
Maximum Layers	15
Growth Rate	1.2
Nodes	1240168
Elements	5414940

C. Simulación numérica

La siguiente fase de la simulación, consiste en establecer los parámetros para que los resultados obtenidos se acerquen a los reales, para esto se determinaron las siguientes condiciones.

Condiciones generales del modelo: Se estableció una solución basada en un dominio de aire a las condiciones indicadas en la tabla 2. También se consideró un modelo de turbulencia SST [11], [12], [13] y, un tiempo estacionario.

TABLA 2
CONDICIONES GENERALES DEL MODELO

Domain Type	Fluid Domain
Material	Air at 25 C
Density	1.185 kg/m ³
Reference Pressure	1 atm
Turbulence	Shear Stress Transport

D Condiciones de contorno

Se determinó de acuerdo al funcionamiento del inyector y a la geometría diseñada, donde fueron divididas por la entrada de aire, salida a la atmosfera, simetría y las paredes del inyector y tubería de ingreso, para las cuales se determinaron parámetros diferentes que serán descritos a continuación. En la tabla 3, se observa los parámetros dados para la realización de la simulación.

**TABLA 3
PARÁMETROS INICIALES PARA LA SIMULACIÓN**

	Boundary "Entrada"	Boundary "Atmosfera"	Boundary "Simetría"	Boundary "Inyector"
Boundary Type	Inlet	Opening	Symmetry	Wall
Location	Entrada Aire Presion	Atmosfera y Entrada Aire Lado Jet	Simetría	Inyector y tubería
Option	Mass Flow Rate	Opening Press. And Dim		
Relative Pressure	141 SLPM	1 atm		
Flow Direction	Normal to Boundary Condition	Normal to Boundary Condition		
Turbulence	Zero Gradient	Medium (Intensity = 5%)		

E. Pruebas experimentales

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos por la simulación se realizaron pruebas experimentales para diferentes condiciones de operación. En la figura 6 se tiene el equipo que se diseñó para la prueba experimental con los siguientes instrumentos: (i) manómetro, (ii) uniones (iii) Inyector. Además, se utilizó un flujómetro instalado antes del manómetro indicado en la figura.



Fig. 6: Equipo para prueba experimental.

De las pruebas experimentales se midieron los siguientes resultados (Tabla 4, siendo SLPM=litros por minuto estándar).

**TABLA 4
VARIABLES MEDIDOS EN LABORATORIO**

CAUDAL	PRESIÓN	CAUDAL	PRESIÓN	CAUDAL	PRESIÓN
SLPM	(Bar)	SLPM	(Bar)	SLPM	(Bar)
103.3	0.7	279	3.5	412	5.7
121	1	282	3.6	422	5.8
156.3	1.4	336	4.4	434	6
168.3	1.7	344	4.7	436	6.1
194.8	2.1	348	4.6	438	6.2
227	2.6	367	5	451	6.3
230	2.7	381	5.2	456	6.4
231	2.8	386	5.3	462	6.5
259	3.2	387	5.4	468	6.6
277	3.4	404	5.6	473	6.7

También se tiene la tabla del fabricante del Jet (Tabla 5).

**TABLA 5
DATOS TÉCNICOS DEL FABRICANTE DEL INYECTOR**

Presión de entrada en la línea	Flujo siguiente Boquilla de aire	
	PSIG (BARG)	Fuerza-lbs (Fuerza-gms)
40 (2.8)	0.525 (238)	7.5 (121)
60 (4.1)	0.772 (350)	12.0 (340)
80 (5.5)	1.00 (454)	14.5 (411)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se compara los resultados experimentales con la información del fabricante para verificar el performance del inyector. Como se puede apreciar en la figura 7 la tendencia de los datos experimentales es muy cercanos a los proporcionados por el fabricante, en algunos casos las condiciones de medición pueden haber variado produciendo la diferencia entre las mediciones.

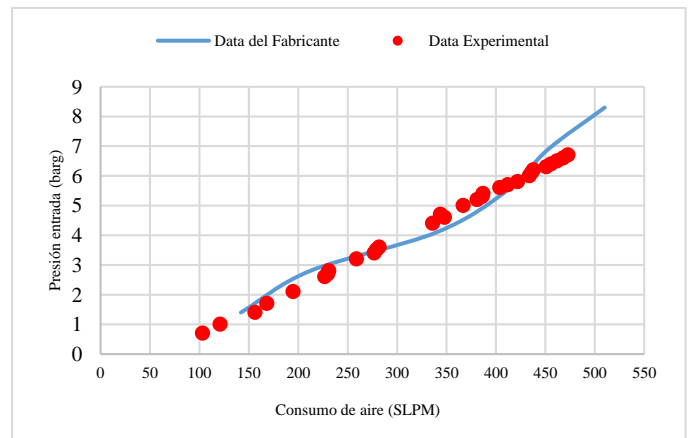


Fig. 7: Comparación data experimental y del fabricante.

A continuación mostramos los resultados obtenidos por el CFD [14], [15], se pueden presentar en contornos de velocidad, líneas de corriente, iso-superficies, animaciones, tablas, gráficos, etc. En las figuras 8 y 9 tenemos el contorno de velocidad a 142 SLPM y 510 SLPM respectivamente, se recuerda que esta simulación es considerando un caudal de ingreso igual al proporcionado en la tabla del fabricante y la idea es corroborar con los resultados obtenidos en laboratorio.

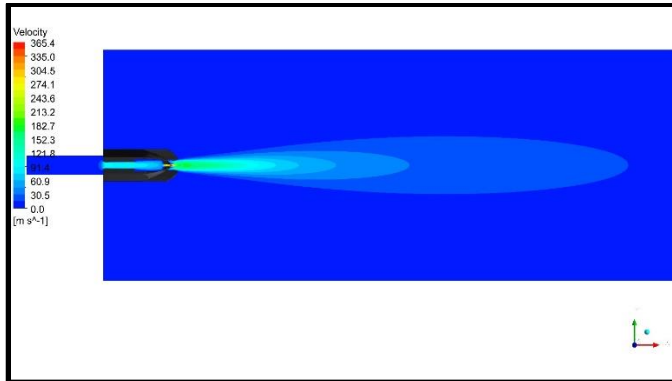


Fig. 8: Simulación de la velocidad en el inyector a 142 SLPM.

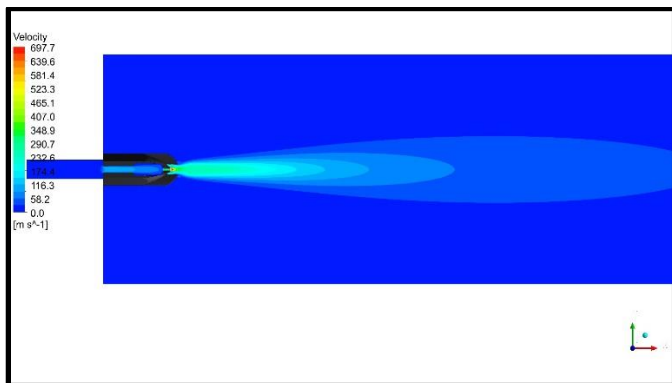


Fig. 9: Simulación de la velocidad en el inyector a 510 SLPM.

En las figuras 10 y 11 tenemos como resultado los contornos de la presión absoluta a 142 SLPM y 510 SLPM respectivamente proporcionados en la tabla del fabricante.

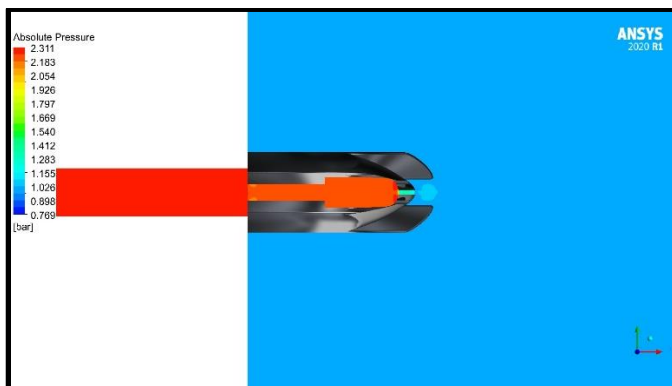


Fig. 10: Presión Absoluta a 142 SLPM.

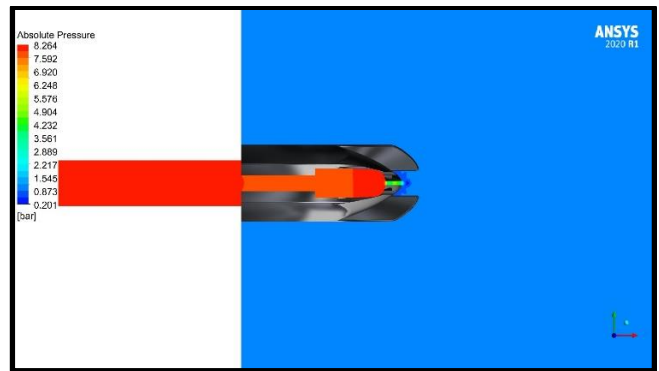


Fig. 11: Presión Absoluta a 510 SLPM.

El mallado aplicado cercano a las paredes permite obtener la fluidodinámica del inyector con mayor detalle de descripción. El “Inflation” aplicado a las paredes del inyector permite visualizar la correcta disposición del fluido, obteniendo la velocidad igual a cero muy cercana a las paredes y el clásico perfil de velocidades de flujos internos (Figura 12).

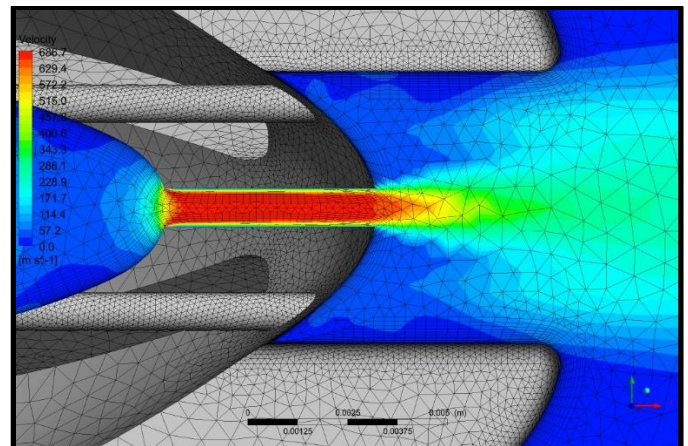


Fig. 12: Simulación de las velocidades de los flujos internos

En la figura 13 se tienen las líneas de corriente que pasan por el inyector de aire.

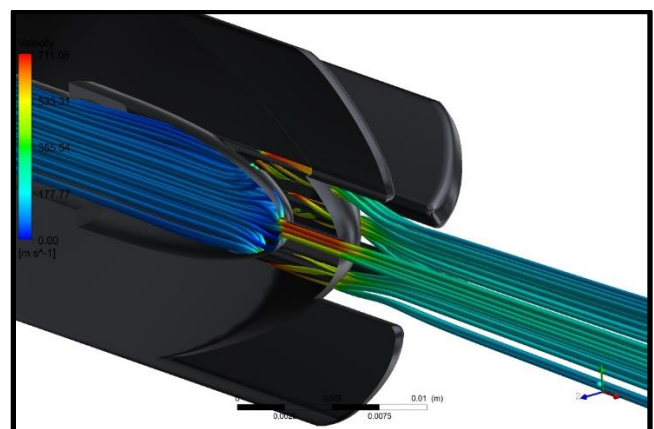


Fig. 13: Simulación de las líneas de corrientes que pasan por el inyector

En la figura 14 se comparan los resultados obtenidos por el CFD con la data proporcionada por el fabricante.

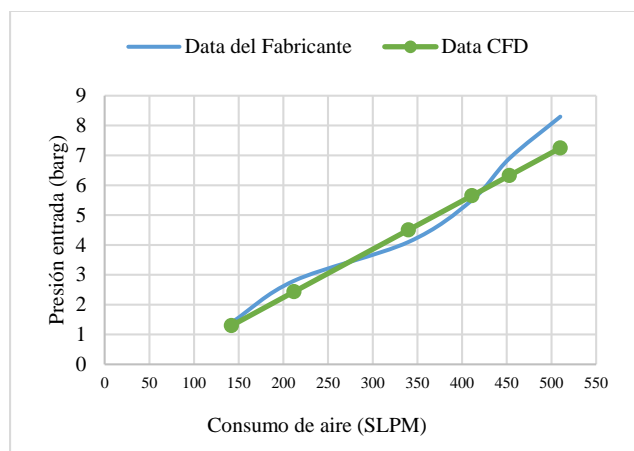


Fig. 14: Comparación data CFD y del fabricante.

Finalmente se realizó una comparación entre la data experimental y la data obtenida por el CFD [16], como se puede visualizar en la figura 15 los resultados por la simulación se aproximan a la tendencia de la data experimental, validando de esta manera el modelo CFD obtenido con el software comercial ANSYS.

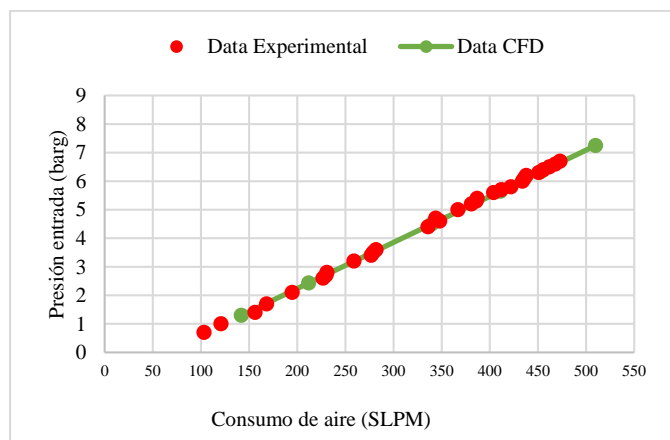


Fig. 15: Comparación data Experimental y CFD.

Los resultados de esta simulación comparada con las bibliografías adjuntas tienen mucho en común, si bien existe bastante información sobre el estudio fluidodinámico de los inyectores, esta es teórica y lo resaltante de este estudio es haber podido comparar con data experimental enriqueciendo de esta manera los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

Siendo importante para el Proyecto de selección de papas seleccionar un inyector apropiado que cumpla el objetivo se concluye:

Que el inyector seleccionado modelo 47004 AMF cumple con el objetivo del Proyecto validándose experimentalmente

según data técnica del fabricante el comportamiento fluidodinámico del aire a través del inyector.

Usando la simulación CFD, se llegó a conocer al detalle la fluidodinámica del fenómeno, y saber que dichos resultados son muy cercanos a los obtenidos en las pruebas experimentales.

La comparación de la data permite confiar en la simulación CFD, validando de esta manera el modelo y los resultados obtenidos.

Como conclusión adicional es importante conocer al detalle el campo de presiones y de velocidades, pues permite ampliar el conocimiento que se tiene del fenómeno en estudio.

Finalmente, se concluye que el inyector modelado servirá para el uso del Proyecto de selección de papa que está siendo estudiado (047-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU).

Trabajos futuros contemplan el uso del modelo del inyector para realizar análisis detallados sobre el desvío de la papa por la acción del aire que expulsa el inyector.

RECONOCIMIENTO

Los autores reconocen el apoyo financiero del Proyecto CONCYTEC-BANCO MUNDIAL "Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica" 8682-PE, a través de su unidad ejecutora FONDECYT. [047-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU]

REFERENCES

- [1] T. Sloopmaekers, P. Slaets, T. Bartsoen, L. Malfait, M. Vanierschot, and C. G. T. Leuven, "Effect of Nozzle Geometry on the Efficiency of Compressed Air," pp. 298–302.
- [2] H. Awbi, "Book Review - Ventilation of Buildings," *Int. J. Vent.*, vol. 2, no. 3, pp. 287–289, 2003.
- [3] G. Cican, V. Stanciu, and D. Crunteanu, "Analytical and numerical study of the nozzle jet," *UPB Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.*, vol. 76, no. 1, pp. 37–44, 2014.
- [4] L. R. N., "Analysis of Flow of Nozzles by Using Computational Fluid Dynamics," *Int. J. Psychosoc. Rehabil.*, vol. 23, no. 3, pp. 390–399, 2019.
- [5] M. Kmecova, O. Sikula, and M. Krajcik, "Circular Free Jets: CFD Simulations with Various Turbulence Models and Their Comparison with Theoretical Solutions," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, no. 6, 2019.
- [6] T. J. Tipnis, "Effects of upstream nozzle geometry on rectangular free jets," *Thesis*, no. July, 2009.
- [7] S. Aloysius, L. C. Wrobel, and I. Fuller, "ALAQS CFD Comparison of Buoyant and Non-Buoyant Turbulent Jets," 2007.
- [8] M. GÜDÜCÜ, "CFD analysis of nozzle effect on jet formation," 2015.
- [9] M. Kaushik, R. Kumar, and G. Humrutha, "Review of Computational Fluid Dynamics Studies on Jets," vol. 5, pp. 1–11, 2015.
- [10] G. Daniel and R. Tutor, "Trabajo de Fin de Grado Grado en Ingeniería Aeroespacial Métodos Numéricos Sencillos para el Cálculo de Chorros y Penachos Térmicos Laminares," 2016.
- [11] F. R. Menter, R. Lechner, and A. Matyushenko, "Best Practice : Generalized k- w Two-Equation Turbulence Model in ANSYS CFD (GEKO)," pp. 1–38, 2019.
- [12] Ansys, "Modeling of Turbulent Flows," *Fluent user Guid.*, p. 49, 2006.
- [13] K. Hutter, Y. Wang, and I. P. Chubarenko, "Turbulence Modelling," *Adv. Geophys. Environ. Mech. Math.*, pp. 185–220, 2011.
- [14] S. SD, V. TA, R. KS, and M. Chavali, "CFD Simulation of Ejector in Steam Jet Refrigeration," *J. Appl. Mech. Eng.*, vol. 06, no. 03, 2017.

- [15] O. Kosti, Z. Stefanović, and I. Kostić, "Comparative CFD analysis of a 2D supersonic nozzle flow with jet tab and jet vane," *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 24, no. 5, pp. 1335–1344, 2017.
- [16] L. P. Tschaeppe, "Liquid Jet Experiments and Simulations for a Verification and Validation Study," 2012.