



<https://eq1code.co/a/5hVkuΓ>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Validation of an Experimental Simulation Model Based on Computational Fluid Dynamics

Validación de un modelo experimental de simulación basado en Dinámica de Fluidos Computacional

MSc. Alexander Laffita-Leyva¹, Dr.Cs. Arturo Martínez-Rodríguez¹¹, Ing. Enmanuel Ávila-González¹¹,
MSc. Lázara Rangel-Montes de Oca¹

¹ Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. ¹¹ Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

ABSTRACT. As part of a research project aimed at determining the effect of extreme winds on agricultural economic objectives, through the application of simulation methods based on Computational Fluid Dynamics and finite elements analysis, some experimental runs were carried out to validate that simulation method and the criteria used during the formation of the models and the characteristics of the finite element meshing to be applied. For the experimental measurements, a wind tunnel built in the Agricultural Mechanization Center of the Agrarian University of Havana was used, which was modeled in 3D with the SolidWork 2018 computational tool and the simulation was carried out through the “Flow Simulation” module. For the experimental application of the simulation models used, the results of experimental measurements of the pressures within the wind tunnel were compared with the pressures determined by simulation. A variable pressure field in the space was achieved by interposing an obstacle to air circulation, aimed at achieving different pressure levels in different sections of the tunnel. As a result of the comparison, a simulation prediction error was obtained that ranged between 0.53 and 2.07%, which was extremely satisfactory.

Keywords: Fluid Flow, Simulation, Finite Elements.

RESUMEN. Como parte de la ejecución de un proyecto de investigación dirigido a la determinación del efecto de vientos extremos sobre objetivos económicos agropecuarios, mediante la aplicación de métodos de simulación basados en la Dinámica de Fluidos Computacional, que a su vez se sustenta en el análisis por elementos finitos, se efectuaron algunas corridas experimentales dirigidas a validar dicho método de simulación, así como los criterios empleados durante la conformación de los modelos y de las características del mallado de elementos finitos a aplicar. Para las mediciones experimentales se utilizó un túnel de viento construido en el Centro de Mecanización Agropecuaria de la Universidad Agraria de La Habana, el cual fue modelado en 3D con la herramienta computacional SolidWork 2018, efectuando la simulación mediante el módulo “Flow Simulation”. Para la aplicación experimental de los modelos de simulación empleados se compararon los resultados de mediciones experimentales de las presiones dentro del túnel de viento con las presiones determinadas mediante la simulación. Un campo de presiones variable en el espacio se logró interponiendo un obstáculo a la circulación del aire, dirigido a lograr diferentes niveles de presión en distintas secciones del túnel. Como resultado de la comparación se obtuvo un error de predicción de la simulación que osciló entre 0,53% y 2,07%, lo cual resultó sumamente satisfactorio.

Palabras clave: flujo de fluidos, simulación, elementos finitos.

INTRODUCTION

Tropical cyclones formed in the Atlantic Ocean and in the Caribbean Sea and their proximities, constitute a habitual

INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales que se forman en el océano Atlántico y en el mar Caribe y sus proximidades, constituyen un peligro

¹ Autor para la correspondencia: Arturo Martínez Rodríguez, e-mail: armaro646@gmail.com

Recibido: 16/01/2020.

Aprobado: 25/09/2020.

danger for the countries of the Caribbean area. Annually, in this area, about 20 tropical depressions can occur, great part of which develop up to hurricane categories, which reach winds exceeding 250 km/h in the case of category V hurricanes on Saffir-Simpson scale. At present, due to the effects of climate change on the planet, as well as the influence of “El Niño” phenomenon, hurricanes more frequently reach category III, IV or V, and cause severe destruction in economic objectives, among which are the agricultural facilities and the crops themselves.

August, September and October are the months with the highest frequency of cyclonic disturbances and hurricanes in Cuba, formed in the Caribbean Sea, Gulf of Mexico and North Atlantic Ocean.

The damages and losses suffered by Cuban agriculture as result of hurricanes’ onslaught are of great magnitude and demand enormous efforts for its recovery.

According to information from the Department of Defense and Civil Defense of the Ministry of Agriculture cited by Ríos (2017), only Hurricane Irma, which hit Cuba in September 2017, affected 50 000 hectares of various crops, of which 26 915 hectares were of banana, a quarter of the existing in the country. Likewise, according to the same source, 1 900 hectares of rice and 4 520 hectares of coffee were damaged, and other crops such as cassava and other food and vegetables were also damaged. In the case of poultry, 383 buildings were damaged, of which 77 were totally destroyed, with numerous deaths of birds, mainly layers. The force of the hurricane also devastated 500 dairy farms and large livestock buildings, causing more than 1000 deaths of calves. The onslaught of this hurricane affected the provinces of Holguín, Las Tunas, Camagüey, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus, Havana and Mayabeque.

The president of the Livestock Entrepreneurial Group has declared that due to their characteristics of large open warehouses and light covers with dozens of years, poultry farming “has been practically forced to reborn repeatedly” by the occurrence of different meteorological events Figueredo y Romeo (2019). According to this same source, Cuban poultry industry has more than 400 base business units of which 289 are production farms, 19 are genetic farms, 64 incubation plants, 75 replacements and raising farms and 106 egg production farms, in addition to 13 feed mills and 5 large warehouses to accumulate protein grains.

Hurricane Gustav, that hit Isla de la Juventud Municipality and Pinar del Río Province in August 2008, affected 63 poultry houses and 3 500 tobacco houses.

The study of the effect of hurricane-force winds on certain objectives has been a complex subject to be approached from an experimental point of view, since it is only possible to reproduce these phenomena and their effects in large-scale wind tunnels and also by applying techniques of the theory of similarity and making models of the objectives to be hit by the wind.

Nowadays, with the advances in computing and the existence of specialized programs in fluid dynamics analysis, based on numerical methods of finite elements (CFD,

habitual para los países del área del Caribe. Anualmente, solo en esta área pueden producirse cerca de 20 depresiones tropicales, una buena parte de las cuales se desarrollan hasta las categorías de huracán, alcanzando vientos superiores a los 250 km/hr en el caso de huracanes de categoría V en la escala Saffir-Simpson. En la actualidad, por los efectos del cambio climático que sufre el planeta, así como por la influencia del fenómeno “El Niño”, con mayor frecuencia los huracanes alcanzan categorías III, IV o V, causando severas destrucciones en objetivos económicos, entre los que se encuentran las instalaciones agropecuarias y los propios cultivos.

Son agosto, septiembre y octubre los meses con mayor frecuencia de afectación en Cuba de perturbaciones ciclónicas y huracanes formados en el Mar Caribe, Golfo de México y Océano Atlántico Septentrional.

Los daños y pérdidas que sufre la agricultura cubana producto del embate de los huracanes son de gran magnitud y conllevan enormes esfuerzos para su recuperación.

De acuerdo a informaciones del Dpto. de Defensa y Defensa Civil del Ministerio de Agricultura citado por Ríos (2017), solo el huracán Irma, que azotó a Cuba en septiembre de 2017 afectó 50 mil hectáreas de cultivos varios, de ellas 26 mil 915 hectáreas de plátano, la cuarta parte de las existentes en el país. Asimismo, de acuerdo a la misma fuente, se dañaron unas mil 900 hectáreas de arroz y cuatro mil 520 de café, viéndose dañados igualmente otros cultivos como la yuca y otras viandas y hortalizas. En el caso de la avicultura se reportaron daños en 383 naves, de las que 77 quedaron destruidas totalmente, ocurriendo numerosas muertes de aves, principalmente ponedoras. La fuerza del huracán hizo estragos además en 500 vaquerías y naves de ganado mayor, provocando más de mil muertes de terneros y crías. El embate de este huracán, afectó a las provincias de Holguín, Las Tunas, Camagüey, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus, La Habana y Mayabeque.

El presidente del Grupo Empresarial Ganadero ha declarado Figueredo y Romeo (2019) que por sus características de naves abiertas de gran tamaño y cubiertas ligeras con decenas de años, la avicultura “se ha visto obligada prácticamente a renacer en reiteradas ocasiones” por el paso de diferentes eventos meteorológicos. Según esta misma fuente, la avicultura cubana cuenta con más de 400 unidades empresariales de base; de las cuales 289 son granjas de producción. 19 son granjas genéticas, 64 plantas de incubación, 75 granjas de reemplazo e inicio y 106 granjas de producción de huevos, además de 13 fábricas de pienso y 5 grandes almacenes para acumular los granos proteicos.

El huracán Gustav, que azotó al municipio de la Isla de la Juventud y a la provincia de Pinar del Río en agosto de 2008, afectó 63 naves avícolas y 3500 casas de tabaco.

El estudio del efecto de los vientos huracanados sobre determinados objetivos ha sido un tema complejo de abordar desde el punto de vista experimental, ya que sólo es posible reproducir estos fenómenos y sus efectos en túneles de viento de grandes proporciones y además aplicando técnicas de la teoría de semejanza y confección de maquetas de los objetivos a impactar por el viento.

Hoy en día, con los avances de la computación y la existencia de programas especializados en el análisis de dinámica de fluidos, basado en métodos numéricos de elementos finitos (CFD, Computational Fluid Dynamics), es posible abordar este tipo de estudio mediante la simulación numérica, con un alto grado de aproximación.

Computational Fluid Dynamics), it is possible to approach this type of study through numerical simulation, with a high degree of approximation.

The research that is proposed is of great interest to evaluate the effect of hurricane-force winds on different economic objectives, as well as to recommend certain protection measures that can mitigate their effects.

In the case of agriculture, there are numerous examples of targets that can be affected by extreme winds, among which greenhouses, poultry and other livestock farms, milking farms, batteries of photovoltaic panels for the generation of electricity and others, like the crops themselves that are affected by the winds' action.

The use of Computational Fluid Dynamics tools, applied to the simulation of the action of winds on certain targets, will provide the distribution of pressures and forces on them, under the impact of winds of different magnitude and direction. It will also make possible to assess the mitigation capacity of certain elements, such as windbreaks, improvements in the design of the targets and other means of protection.

Computational Fluid Dynamics is a valuable tool for fluid simulation studies and due to that, it has been used by various researchers during the performance of dissimilar tasks related to fluid flow (Hofmann *et al.*, 2001; Balbastro *et al.*, 2004; Balbastro y Sonzogni, 2007; Xia *et al.*, 2007; Gofran, 2008; Alexandrikova *et al.*, 2011; Herrera *et al.*, 2012, 2012; Martínez *et al.*, 2013; Herrera *et al.*, 2014, 2015; Hsu y Wu, 2017; Herrera *et al.*, 2018). This computational tool represents a valuable and economical alternative for conducting complex studies that have traditionally been carried out in wind tunnels (Natalini *et al.*, 2001; Guan *et al.*, 2003; Gromke y Ruck, 2008; Bitog *et al.*, 2011). the use of windbreaks as a means of protection against the action of winds (Borrelli *et al.*, 1989; Balbastro *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2013); including crop protection (Boldes y Colman, 2003).

In general, crops and agricultural facilities are located in open areas and are exposed to the incidence of extreme winds. This situation is aggravated by the geographical situation of Cuba, located in the Caribbean Sea in an area frequently hit by hurricanes of different categories. Consequences of climate change like the increasing, both, frequency and intensity of hurricanes are added to these vulnerability elements.

Given this situation, as well as the economic, social and environmental cost imposed by the occurrence of hurricanes, it is necessary to carry out studies that make it possible to take measures to mitigate or diminish the effects that these extreme winds may cause on certain objectives of the rural areas of the country.

As it is not feasible to carry out conventional experiments, creating artificial hurricanes acting on economic objectives of great extension or magnitude, this research is oriented to the use of numerical simulation methods, supported by computerized tools of fluid dynamics, in order to carry out virtual experiments on digitized models and determine the effect of extreme winds on certain economic objectives subjected to the action of hurricanes.

La investigación que se propone presenta un gran interés con vistas a evaluar el efecto de vientos huracanados sobre diferentes objetivos económicos, así como poder recomendar determinadas medidas de protección que puedan mitigar el efecto de dichos vientos.

En el caso de la agricultura, existen numerosos ejemplos de objetivos que pueden ser afectados por los vientos extremos, entre los cuales pueden mencionarse las casas de cultivo, las naves de cría de aves u otros animales, las naves de ordeño, las baterías de paneles fotovoltaicos destinados a la generación de electricidad y otros, destacándose además los propios sembrados que son afectados por la acción de los vientos.

El empleo de las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional, aplicados a la simulación de la acción de los vientos sobre determinados objetivos, posibilitará obtener la distribución de presiones y fuerzas sobre éstos, bajo el impacto de vientos de diferente magnitud y dirección. Asimismo posibilitará evaluar la capacidad de mitigación de determinados elementos, tales como cortinas rompevientos, mejoras en el diseño de los objetivos u otros medios de protección.

La Dinámica de Fluidos Computacional constituye una valiosa herramienta para estudios de simulación de fluidos, por lo que ha sido empleada por diversos investigadores durante la realización de disímiles tareas relacionadas con el flujo de fluidos (Hofmann *et al.*, 2001; Balbastro *et al.*, 2004; Balbastro y Sonzogni, 2007; Xia *et al.*, 2007; Gofran, 2008; Alexandrikova *et al.*, 2011; Herrera *et al.*, 2012, 2012; Martínez *et al.*, 2013; Herrera *et al.*, 2014, 2015; Hsu y Wu, 2017; Herrera *et al.*, 2018). Esta herramienta computacional representa una valiosa y económica alternativa para la realización de complejos estudios que tradicionalmente han sido realizados en túneles de viento (Natalini *et al.*, 2001; Guan *et al.*, 2003; Gromke y Ruck, 2008; Bitog *et al.*, 2011). Con estas herramientas ha sido evaluado asimismo, el efecto de vientos sobre objetivos económicos, así como el empleo de cortinas rompevientos como medios de protección ante la acción de los vientos (Borrelli *et al.*, 1989; Balbastro *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2013); incluyendo la protección de cultivos (Boldes y Colman, 2003).

Por lo general, los cultivos y las instalaciones agropecuarias se encuentran en zonas descubiertas, estando expuestas a la incidencia de vientos extremos. Esta situación se agrava por la situación geográfica de Cuba, enclavada en el mar Caribe en una ubicación azotada frecuentemente por huracanes de diferente categoría. A esto se une las consecuencias del cambio climático que sufre el planeta que, entre sus efectos, se ha comprobado el incremento, tanto de la frecuencia de los huracanes, como de la intensidad de los mismos.

Dada esta situación, así como el costo económico, social y medioambiental que impone el paso de los huracanes, es menester ejecutar estudios que posibiliten la toma de medidas para la atenuación o mitigación de los efectos que pueden ocasionar esos vientos extremos sobre determinados objetivos de las zonas rurales del país.

Como quiera que no es factible efectuar experimentos convencionales, creando huracanes artificiales actuando sobre objetivos económicos de gran extensión o magnitud, esta investigación está orientada al empleo de métodos de simulación numérica, aplicando herramientas computarizadas de dinámica de fluidos, de manera de poder realizar experimentos virtuales sobre modelos digitalizados y determinar el efecto de vientos extremos sobre determinados objetivos económicos sometidos a la acción de huracanes.

Various authors Martínez *et al.* (2013); Báez y Pozos (2017) have used numerical simulation methods to study the action of hurricane force winds on certain targets, however, they do not report comparative studies with experimental results that allow validating the use of these methods, or at least knowing the level of prediction error of the model with respect to the experimental test.

The present work aims to present the results of a group of experiments carried out in a wind tunnel, aimed at obtaining data that could be compared with the calculations from simulation models using Computational Fluid Dynamics tools and consequently, obtaining some level of validation of the use of these tools in the analysis of high intensity winds.

METHODS

The experimental runs were carried out in a wind tunnel designed and built in the Center for Agricultural Mechanization (CEMA) of the Faculty of Technical Sciences of the Agrarian University of Havana. Dynamic pressure readings were taken in different sections inside the tunnel with an air flow close to $10 \text{ m}^3/\text{s}$, simulating hurricane-force winds of the order of 36 m/s . These measurements were compared with the result of dynamic pressure calculations obtained through simulation in a three-dimensional model of the same wind tunnel, carried out with the “Flow Simulation” tool of the Solidwork 2018 software. The comparison was made with the presence of an obstacle to the air circulation located in the air intake area, in order to provide an aerodynamic situation with a greater degree of possible turbulence.

The wind tunnel used during the experimentation is shown in Figure 1, where its dimensions and 12 access points in different sections can also be seen. They were made for measures taking with a Pitot tube coupled to a differential manometer (Figure 2).

Diversos autores Martínez *et al.* (2013); Báez y Pozos (2017) han empleado métodos de simulación numérica para el estudio de la acción de vientos huracanados sobre determinados objetivos, sin embargo, no reportan estudios comparativos con resultados experimentales que permitan validar el empleo de estos métodos, o al menos conocer el nivel de error de predicción del modelo con respecto al ensayo experimental.

El presente trabajo tiene como objetivo exponer los resultados de un grupo de experimentos realizados en un túnel de viento, dirigidos a la obtención de datos que pudieran ser comparados con los cálculos provenientes de modelos de simulación empleando herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional y, de esta forma, obtener algún nivel de validación del empleo de estas herramientas en el análisis de vientos de alta intensidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las corridas experimentales fueron realizadas en un túnel de viento diseñado y construido en el Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad Agraria de La Habana. Fueron tomadas lecturas de presión dinámica en diferentes secciones en el interior del túnel con un flujo de aire cercano a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, simulando vientos huracanados del orden de los 36 m/s . Estas mediciones fueron comparadas con el resultado de cálculos de la presión dinámica obtenidos mediante la simulación en un modelo tridimensional del propio túnel de viento, efectuada con la herramienta “Flow Simulation” del software Solidwork 2018. La comparación se efectuó con la presencia de un obstáculo a la circulación del aire situado en la zona de entrada del aire, de manera de proporcionar una situación aerodinámica con mayor grado de posible turbulencia.

El túnel de viento empleado durante la experimentación se muestra en la Figura. 1, donde puede apreciarse asimismo sus dimensiones y los puntos de acceso (12 puntos) en diferentes secciones, habilitados para la toma de las mediciones, efectuadas con un tubo de Pitot acoplado a un manómetro diferencial (Figura.2).

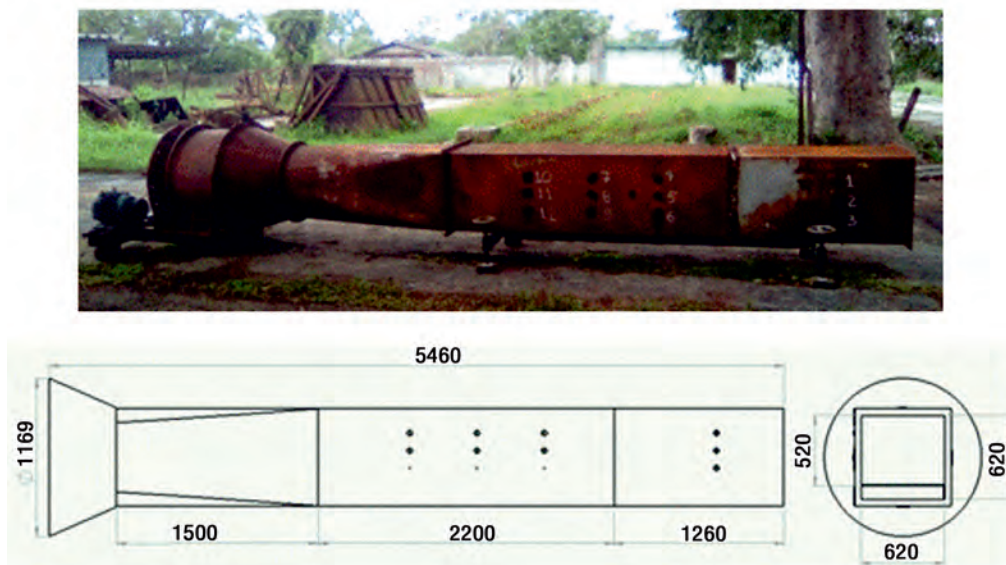


FIGURE. 1 Wind tunnel used in the experimental measurements.
FIGURA. 1 Túnel aerodinámico empleado en las mediciones experimentales.

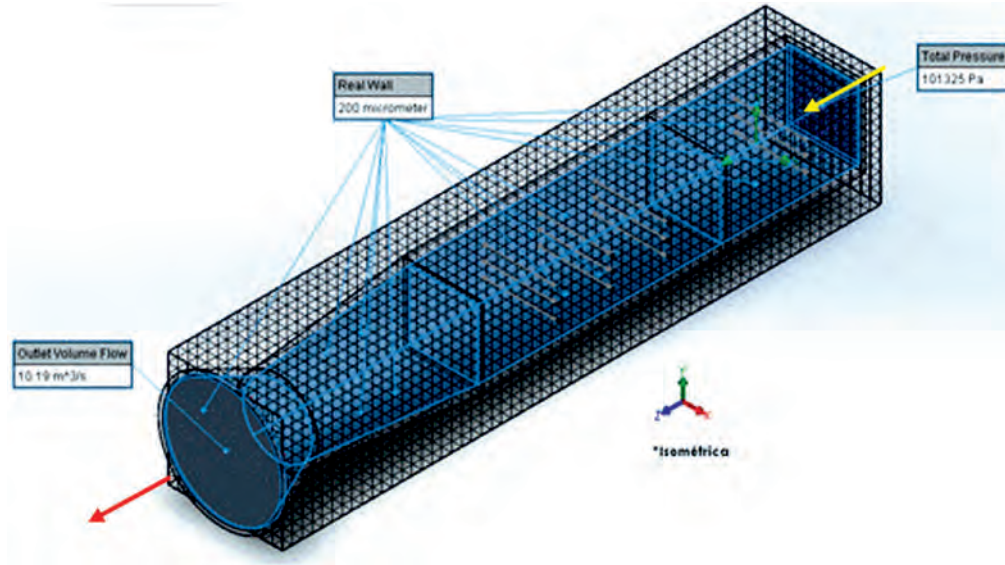


FIGURE 3. Meshing of the computational domain and boundary conditions
 FIGURA 3. Mallado del dominio computacional y condiciones fronteras.

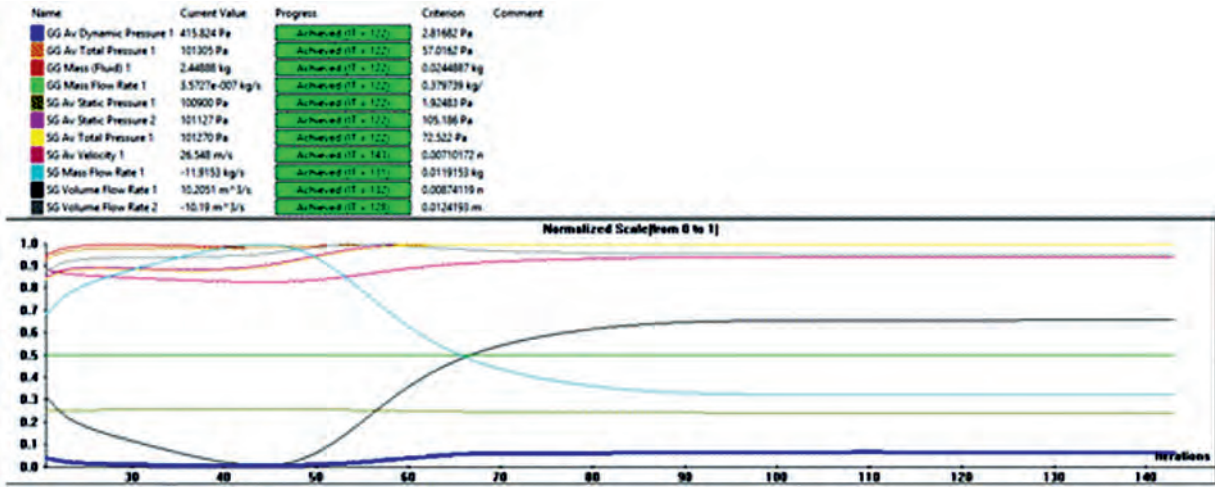


FIGURE 4. Convergence of the results of CDF analysis
 FIGURA 4. Convergencia de los resultados del análisis CFD.

The distribution of dynamic pressure inside the tunnel for a volume flow of $10 \text{ m}^3/\text{s}$, obtained by simulation with C.F.D., is shown in Figure 5 where values obtained by simulation in points of experimental measurement by Pitot tube are pointed out (central points in measurement planes 1, 2 and 3).

La distribución de la presión dinámica en el interior del túnel para un flujo volumétrico de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, obtenida mediante la simulación mediante C.F.D. se muestra en la Figura 5, donde se ha señalado los valores obtenidos como resultado de la simulación en los puntos que fueron objeto de medición experimental mediante el tubo de Pitot (puntos centrales de los planos de medición 1, 2 y 3).

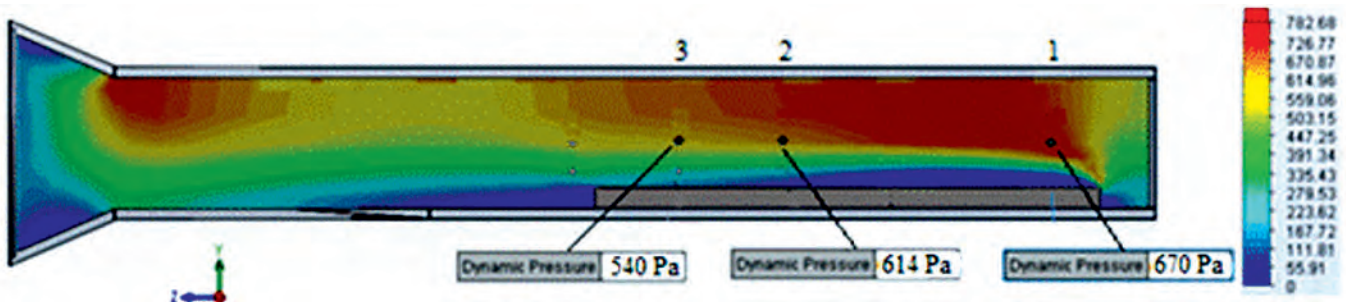


FIGURE 5. Distribution of the dynamic pressure inside the tunnel for a volumetric flow of $10 \text{ m}^3/\text{s}$.
 FIGURA 5. Distribución de la presión dinámica en el interior del túnel para un flujo volumétrico de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

The results of the experimental measurements of the dynamic pressure for an average real volumetric flow of 9 763 m³/s are shown in Table 1. There, average values are compared of these measures with the values of the dynamic pressure obtained by simulation.

Los resultados de las mediciones experimentales de la presión dinámica para un flujo real volumétrico medio de 9,763 m³/s se muestran en la Tabla 1, en la que se comparan los valores medios de estas mediciones con los valores de la presión dinámica obtenidos mediante la simulación.

TABLE 1. Results of comparing experimental measurements and the determination by simulation for a volumetric flow close to 10m3/s
TABLA. 1. Resultados de la comparación de las mediciones experimentales y la determinación mediante simulación para un flujo volumétrico cercano a 10 m³/s.

Planes of Measurement	Dynamic Pressure				Real Volumetric Flow	
	Experimental Measurement I		Determination by Simulation		Q, m ³ /s	
	P _d , Pa		P _d , Pa		X _{mj}	U _{tj}
	X _{mj}	U _{tj}	X _{mj}	DE (%)	X _{mj}	U _{tj}
Plano 1	658,07	6,91	670	1,81		
Plano 2	610,76	9,91	614	0,53	9,763	0.12
Plano 3	529,04	9,16	540	2,07		

As it can be seen in Table 1 the prediction error of the simulation ranged between 0,53% and 2,07%, which is highly satisfactory, even when it is necessary to point out that all values simulated were superior to the ones measured experimentally. That is surely due to that, in real conditions, only a level of flow a little inferior to the one selected for the simulation could be reached in the tunnel.

Como se aprecia de la Tabla 1, el error de predicción de la simulación osciló entre 0,53% y 2,07%, lo cual es sumamente satisfactorio, aunque es necesario resaltar que todos los valores simulados fueron superiores a los medidos experimentalmente, lo cual seguramente es debido a que en condiciones reales solo pudo alcanzarse en el túnel un nivel de flujo algo inferior al seleccionado para la simulación.

CONCLUSIONS

- When comparing the results of calculations performed by simulation tools based Computational Fluid Dynamics (CFD) to experimental measurements carried out in the same conditions of simulation, a satisfactory level of prediction was obtained that ranged between 0,53% and 2,07%.
- This result confirms the application of numeric methods based in finite elements analysis, “Flow Simulation” del software Solidwork, versión 2018 in this case, during the simulation of air flow of high density.

CONCLUSIONES

- Como resultado de la comparación de resultados de cálculos efectuados mediante herramientas de simulación basadas en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con mediciones experimentales realizadas en las mismas condiciones de simulación, se obtuvo un nivel de predicción satisfactorio, que osciló entre 0,53% y 2,07%;
- Este resultado confirma la aplicación de métodos numéricos basados en análisis por elementos finitos, en este caso el módulo “Flow Simulation” del software Solidwork, versión 2018, durante la simulación de corrientes de aire de alta intensidad.

REFERENCES

ALEXANDRIKOVA, T.; PAVLOV, A.; STRELTSOV, V.: *Hybrid density-and pressure-based splitting scheme for cavitating flows simulation*, Ed. A.A. Mammoli, C.A. Brebbia, WIT Transactions on Engineering Sciences WIT Press, vol. 70, 41-56 p., 2011, ISBN: 978-1-84564-518-2.

BÁEZ, D.A.; POZOS, E.A.: *Simulación numérica de los efectos del viento sobre un conjunto de paneles solares*, Inst. Universidad Nacional Autónoma de México., Cuernavaca, Morelos, México, 2017.

BALBASTRO, G.; SONZOGNI, V.: “Simulación de un ensayo en túnel de viento aplicando CFD”, *Mecánica Computacional*, 26: 3779-3787, 2007.

BALBASTRO, G.C.; SONZOGNI, V.E.; FRANCK, G.; STORTI, M.: “Acción del viento sobre cubiertas abovedadas aisladas: simulación numérica.”, *Mecánica Computacional*, 23, 2004.

BITOG, J.; LEE, I.-B.; HWANG, H.-S.; SHIN, M.-H.; HONG, S.-W.; SEO, I.-H.; MOSTAFA, E.; PANG, Z.: “A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag”, *Forest Science and technology*, 7(1): 8-16, 2011, ISSN: 2158-0103.

BOLDES, U.; COLMAN, J.: *La protección de los cultivos de los efectos del viento*, Ed. Viento, Suelo y Plantas, INTA, Golberg A.D.; Kin A.G, BsAs ed., Argentina, 2003, ISBN: 987-521-104-4.

BORRELLI, J.; GREGORY, J.; ABTEW, W.: “Wind barriers: a reevaluation of height, spacing, and porosity”, *Transactions of the ASAE*, 32(6): 2023-2027, 1989, ISSN: 2151-0032, e-ISSN: 2151-0040.

- FIGUEREDO, O.; ROMEO, L.: *Producción avícola en Cuba: Realidades y desafíos, [en línea]*, Cubadebate, 2019, Disponible en: <http://www.cubadebate.cu>, [Consulta: 24 de marzo de 2020].
- GOFRAN, C.M.: *Experimental validation of CFD model predicting wind effects on inclined-roof mounted photovoltaic modules*, KTH Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology Division of Heat and Power Technology, Master of Science Thesis, Stockholm, 2008.
- GROMKE, C.; RUCK, B.: "Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies", *Forestry*, 81(3): 243-258, 2008, ISSN: 1464-3626, DOI: 10.1093/forestry/cpn027.
- GUAN, D.; ZHANG, Y.; ZHU, T.: "A wind-tunnel study of windbreak drag", *Agricultural and forest meteorology*, 118(1-2): 75-84, 2003, ISSN: 0168-1923.
- HERRERA, P.M.I.; DE LA FIGAL, C.A.E.; DE LAS CUEVAS, H.; MARTINS, T.M.: "Modelling of the air current in the vertical plane of Hatsuta agricultural sprayer", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(2): 5-11, 2018, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, P.M.I.; DE LA FIGAL, C.A.E.; DE LAS CUEVAS, M.H.R.; MARTINS, T.M.: "Evaluación mediante la Dinámica de los Fluidos por Computadora (CFD) de la corriente de aire del pulverizador agrícola ASS-800", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2): 5-11, 2014, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, P.M.I.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.E.; DE LAS CUEVAS, M.H.R.; MARTINS, T.M.: "Efecto del viento en el flujo de aire de un pulverizador", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2): 44-48, 2015, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HERRERA, P.M.I.; GARCÍA DE LA FIGAL, C.A.E.; RAMOS, C.E.; MARTIN, T.M.: "Simulación mediante la dinámica de fluidos por computadora del efecto de la velocidad del viento en el desempeño de los pulverizadores agrícolas de ventilador", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(1): 19-25, 2012, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- HOFMANN, M.; STOFFEL, B.; COUTIER-DELGHOSA, O.; PATELLA, R.F.; REBOUD, J.-L.: "Experimental and numerical studies on a centrifugal pump with 2D-curved blades in cavitation condition", En: *CAV 2001:session B7.005*, 2001.
- HSU, S.-T.; WU, T.-C.: "Simulated wind action on photovoltaic module by non-uniform dynamic mechanical load and mean extended wind load", *Energy Procedia*, 130: 94-101, 2017, ISSN: 1876-6102.
- MARTÍNEZ, R.A.; LAFFITA, L.A.; LOMBANA, S.M.Y.: "Impacto de vientos extremos en baterías de paneles solares", En: *VII conferencia de Ingeniería Agrícola, AGRING 2013*, San Jose de las Lajas, Mayabeque, Cuba, 2013, ISBN: 978-959-16-2185-6.
- NATALINI, M.B.; CANAVESIO, O.F.; NATALINI, B.; PALUCH, M.J.: "Wind tunnel modelling of mean pressures on curved canopy roofs.", En: *American Conference on Wind Engineering*, Clemson, 2001.
- RÍOS, M.: *Agricultura cubana en recuperación progresiva tras huracán Irma, [en línea]*, Inst. Portal de Radio Habana Cuba., La Habana, Cuba, 2017, Disponible en: <http://www.radiohc.cu/noticias/economy/141924-agricultura-cubana-en-recuperacion-progresiva-tras-huracan-irma>, [Consulta: 24 de marzo de 2020].
- XIA, G.; LI, D.; MERKLE, C.L.: "Consistent properties reconstruction on adaptive Cartesian meshes for complex fluids computations", *Journal of Computational Physics*, 225(1): 1175-1197, 2007, ISSN: 0021-9991.

Alexander Laffita Leyva, Profesor e Investigador, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: alex1@unah.edu.cu

Arturo Martínez Rodríguez, Profesor e Investigador Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: armaro646@gmail.com

Enmanuel Ávila González, Investigador, Instituto de Investigaciones en Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: dptomecan4@iagric.cu

Lázara Rangel Montes de Oca, Profesora, Universidad Agraria de La Habana, Facultad Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba e-mail: lazarar@unah.edu.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.