

Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea

| Fecha de recibido: 02 de junio 2023 | Fecha de aprobado: 07 de septiembre 2023 |

| Reception date: June 2, 2023 | Approval date: September 07, 2023 |

| Data de recebimento: 02 de junho de 2023 | Data de aprovação: 07 de setembro de 2023 |

Zharik Nicole Lee Cruz

<https://orcid.org/0009-0007-1746-3975>
znleec@libertadores.edu.co

Estudiante
Ingeniería Aeronáutica – Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIDAD

Student
Aeronautical Engineering - Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIDAD research group

Estudante
Engenharia Aeronáutica - Fundação
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Função do pesquisador: teórico e redação
Grupo de pesquisa GIDAD

Juan Pablo Gutiérrez Mora

<https://orcid.org/0009-0005-0874-4498>
juanpgutierrez2310@gmail.com

Estudiante
Ingeniería Aeronáutica – Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIDAD

Student
Aeronautical Engineering - Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIDAD research group

Estudante
Engenharia Aeronáutica - Fundação
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Função do pesquisador: teórico e redação
Grupo de pesquisa GIDAD

Santiago José Méndez Rozo

<https://orcid.org/0009-0002-5447-7261>
sjmendezr@libertadores.edu.co

Estudiante
Ingeniería Aeronáutica – Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIDAD

Student
Aeronautical Engineering - Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIDAD research group

Estudante
Engenharia Aeronáutica - Fundação
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Função do pesquisador: teórico e redação
Grupo de pesquisa GIDAD

Ana Maria Arango Guzman

<https://orcid.org/0009-0000-5743-8853>
amarangog@libertadores.edu.co

Estudiante
Ingeniería Aeronáutica – Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIDAD

Student
Aeronautical Engineering - Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIDAD research group

Estudante
Engenharia Aeronáutica - Fundação
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Função do pesquisador: teórico e redação
Grupo de pesquisa GIDAD

Joel Sebastián Riascos Hurtado

<https://orcid.org/0009-0005-7008-4910>
jsriascosh@libertadores.edu.co

Estudiante
Ingeniería Aeronáutica – Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIDAD

Student
Aeronautical Engineering - Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIDAD research group

Estudante
Engenharia Aeronáutica - Fundação
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Função do pesquisador: teórico e redação
Grupo de pesquisa GIDAD

Richard Giovanni Avella Sarmiento

<https://orcid.org/0000-0001-8081-7587>
rgavellas@unal.edu.co

Doctor en Ciencias-Física
Docente – Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación GIDAD

Doctor of Science-Physics
Professor - Fundación Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Role of the researcher: theoretical and writing
GIDAD research group

Doutor em Ciências - Física
Professor - Fundação Universitaria
Los Libertadores, Colombia
Função do pesquisador: teórico e redação
Grupo de pesquisa GIDAD

Cómo citar este artículo: Lee Cruz, Z. N., Gutierrez Mora, J. P., Mendez Rozo, S. J., Arango Guzman, A. M., Riascos Hurtado, J. S., y Avella Sarmiento, R. G. (2023). Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 68-80. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.786>



Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea

Resumen: El helamiento en aeronaves, conocido como *aircraft icing*, es un fenómeno complejo y potencialmente peligroso que ocurre cuando la superficie de una aeronave se cubre de hielo durante el vuelo en condiciones meteorológicas adversas. Este proceso puede tener graves implicaciones en la seguridad y el rendimiento de las aeronaves, afectando la aerodinámica, la estabilidad y el control.

Con este trabajo se pretende analizar los mecanismos de formación de hielo en aeronaves, clasificar y caracterizar los tipos de helamiento, evaluar las condiciones atmosféricas para la formación de hielo, identificar zonas críticas vulnerables al helamiento, explorar estrategias de prevención y mitigación del helamiento y comparar sistemas de protección contra el hielo. Mediante la consecución de estos objetivos, se espera obtener un entendimiento profundo y completo sobre el fenómeno del helamiento en aeronaves, desde sus mecanismos hasta las estrategias para su prevención y mitigación.

Palabras clave: congelación de aeronaves; formación de hielo; efectos del helamiento; estrategias de prevención: mitigación; avances tecnológicos.

Icing in aircraft: a challenge for safety and air efficiency

Abstract: Aircraft Icing is a complex and potentially dangerous phenomenon that occurs when the surface of an aircraft becomes covered in ice during flight in adverse weather conditions. This process can have serious implications for the safety and performance of aircraft, affecting aerodynamics, stability, and control.

This work aims to analyze ice formation mechanisms in aircraft, classify and characterize types of icing, evaluate atmospheric conditions for ice formation, identify vulnerable critical zones to icing, explore icing prevention and mitigation strategies, and compare ice protection systems. By achieving these objectives, a thorough and comprehensive understanding of the icing phenomenon in aircraft is expected to be obtained, ranging from its mechanisms to strategies for its prevention and mitigation.

Keywords: Aircraft icing; icing formation; effects of icing; prevention strategies: mitigation; technological advances.

Congelamento em aeronaves: um desafio para a segurança e eficiência aérea

Resumo: A formação de gelo em aeronaves é um fenômeno complexo e potencialmente perigoso que ocorre quando a superfície de uma aeronave fica coberta de gelo durante o voo em condições meteorológicas adversas. Esse processo pode ter sérias implicações para a segurança e o desempenho das aeronaves, afetando a aerodinâmica, a estabilidade e o controle. Este trabalho tem como objetivo analisar os mecanismos de formação de gelo em aeronaves, classificar e caracterizar tipos de formação de gelo, avaliar as condições atmosféricas para a formação de gelo, identificar zonas críticas vulneráveis à formação de gelo, explorar estratégias de prevenção e mitigação de gelo e comparar sistemas de proteção contra gelo. Ao alcançar esses objetivos, espera-se obter uma compreensão completa e abrangente do fenômeno de formação de gelo em aeronaves, desde seus mecanismos até estratégias para sua prevenção e mitigação.

Palavras-chave: formação de gelo em aeronaves; formação de gelo; efeitos do gelo; estratégias de prevenção: mitigação; desenvolvimentos tecnológicos.

Introducción

El hielo en las aeronaves es un fenómeno climático de alto riesgo que puede afectar el funcionamiento de las estructuras y componentes de la aeronave, poniendo en peligro la integridad de los pasajeros y la tripulación a bordo (Adsuar, 2003). Según la Administración Federal de Aviación (FAA, 2015), la estrategia utilizada para prevenir o resolver el problema del hielo en una aeronave varía dependiendo del tipo de hielo que se forme y las partes críticas que se vean afectadas. Teniendo en cuenta esto, el hielo puede generar diversos efectos negativos en las aeronaves, tales como la disminución de la capacidad de sustentación, el aumento del peso y la resistencia, la necesidad de aumentar la potencia de los motores, así como el potencial fallo en el funcionamiento de ciertos instrumentos en la cabina (Comandancia Departamento del Ejército Washington, 1982).

Es fundamental comprender el origen y las repercusiones de este fenómeno en una aeronave, ya que nos permite desarrollar técnicas y sistemas de protección efectivos para prevenir o mitigar sus efectos. Dentro de este amplio tema, existen conceptos importantes para tener en cuenta, siendo el factor principal la presencia de nubes y congelación de gotas de agua que impactan a la aeronave (Retallack, 1984).

El tema del congelamiento en las aeronaves ha sido abordado por varias fuentes bibliográficas, las cuales han proporcionado valiosa información sobre los diversos aspectos relacionados con este fenómeno. Uno de los factores fundamentales para considerar es la presencia de nubes. De acuerdo con Tan *et al.* (2017), se han identificado dos tipos de nubes que tienen una influencia significativa en la formación de hielo en las aeronaves: las cumuliformes y las estratiformes. Estas nubes presentan temperaturas medias de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Aunque comparten características similares, existe una diferencia crucial: el contenido de agua líquida (LWC, por sus siglas en inglés). Cuanto mayor sea el contenido de agua líquida en las nubes, mayor será la formación de hielo sobre la aeronave.

Además, es importante tener en cuenta el tipo de hielo que puede formarse en la estructura de la aeronave y por qué es fundamental prevenirlo o controlarlo en tierra para evitar causar la pérdida de *performance* o daños mecánicos, y así mantener la seguridad y eficiencia aérea (EASA, 2017). Como afirma Jeck (1983), en su base de datos de variables de las nubes y sus implicaciones en la formación de hielo en aviones, es común encontrar cristales de hielo en las capas superiores de la atmósfera, específicamente en las nubes altas que se desarrollan a altitudes superiores a los 20.000 pies (6096 metros) y que están compuestas principalmente por estos cristales de hielo.

A pesar de que la acumulación de cristales de hielo en el fuselaje no se clasifica como un riesgo crítico, es de vital importancia considerar sus efectos en múltiples componentes esenciales de la aeronave, estos incluyen los compresores de aire, las superficies de sustentación, tanto primarias como secundarias, el tren de aterrizaje, las sondas de presión total y los sistemas de motor y/o entrada de este (Cuesta, 1991). Es crucial reconocer que esta influencia adquiere una relevancia significativa, especialmente en situaciones donde se presentan cambios abruptos en la dirección del flujo de aire, aumento en la velocidad del aire y la velocidad de la aeronave (Cáceres, 2017).

Considerando la causa, el tipo de hielo que puede formarse alrededor de la estructura y el posible impacto en la aeronave, se han desarrollado diversos sistemas, con el propósito de abordar este problema de manera limitada. Según Landsberg *et al.* (2004), se distinguen dos tipos de sistemas: el primero es el sistema antihielo, que tiene como objetivo prevenir la formación de glaseado; el segundo es el sistema de deshielo, que actúa una vez que el glaseado está presente en la aeronave.

Basándonos en lo anterior, en este artículo se abordarán diversos temas que nos permitirán comprender de forma clara y concisa la formación del hielo en las aeronaves. Nos enfocaremos en los factores que influyen en la formación de hielo, seguido de las técnicas de investigación utilizadas para evaluar su impacto en el rendimiento de las aeronaves. Además, se explorarán los diferentes sistemas que las aeronaves

pueden emplear para prevenir o eliminar el hielo, considerando los diversos mecanismos y fluidos que utilizan dichos sistemas. Por último, se expondrán las conclusiones del presente artículo

Metodología

La formación de hielo en aeronaves plantea un desafío de importancia crítica en el campo de la aviación. Se trata de un fenómeno de naturaleza compleja y potencialmente peligrosa que se manifiesta cuando, en medio de condiciones climáticas adversas, la superficie de una aeronave se ve cubierta por una capa de hielo durante su vuelo. La acumulación de hielo en las distintas partes de la aeronave puede tener implicaciones sumamente serias en lo que respecta a su seguridad y su capacidad de desempeño, afectando aspectos esenciales como su aerodinámica, estabilidad y control.

Esta metodología se desarrolla con el objetivo de abordar en detalle los diferentes aspectos relacionados con el helamiento en aeronaves. A través de un enfoque riguroso y sistemático, se busca comprender los mecanismos de formación de hielo, analizar los tipos de helamiento, evaluar las condiciones atmosféricas propicias y explorar estrategias de prevención y mitigación. Además, se considerarán sistemas de protección contra el hielo y su eficacia en la lucha contra este fenómeno.

Para lograr una comprensión completa, se investigan fuentes académicas, literatura especializada y publicaciones científicas en español e inglés. A través de este análisis multidimensional, se examinan los riesgos asociados con el helamiento en aeronaves y se identifican soluciones efectivas para abordar este desafío. Con el fin de proporcionar una base sólida y práctica, se incluyen ejemplos de casos reales que ilustran cómo estas estrategias se aplican en situaciones reales y su impacto en la seguridad y el rendimiento de las aeronaves.

La presente metodología se presenta como una guía detallada que permitirá explorar de manera

sistemática los componentes esenciales del helamiento en aeronaves. A través de este enfoque estructurado, se aspira a generar un conocimiento sólido y práctico que contribuya a una comprensión profunda de este fenómeno y sus implicaciones en la industria de la aviación.

- 1. Recolección de información:** se lleva a cabo una revisión exhaustiva de fuentes académicas, libros especializados y publicaciones científicas relacionadas con el helamiento en aeronaves. La información será recopilada tanto en español como en inglés para asegurar una comprensión completa del tema.
- 2. Análisis de mecanismos de formación de hielo:** se investigan y describen en detalle los distintos mecanismos de formación de hielo en aeronaves, incluyendo el helamiento estructural y el de carburador. Se identifican los factores que contribuyen a cada tipo de helamiento y se analizan sus consecuencias en la seguridad y rendimiento de la aeronave.
- 3. Tipos de helamiento y condiciones atmosféricas:** se clasifican y explican los diferentes tipos de helamiento, considerando las variaciones en las condiciones atmosféricas que conducen a su formación. Se examinan factores como la temperatura, la humedad y la altitud que influyen en la presencia de hielo en la superficie de la aeronave.
- 4. Identificación de zonas críticas:** se realiza un estudio detallado de las zonas críticas de una aeronave que son especialmente propensas al helamiento, como las alas, los estabilizadores y las superficies de control. Se explica cómo el hielo en estas áreas puede afectar la aerodinámica y el control de la aeronave.
- 5. Estrategias de prevención y mitigación:** se exploran las estrategias existentes para prevenir y mitigar el helamiento en aeronaves. Se discuten en profundidad los sistemas de protección contra el hielo, como la calefacción de superficies y los sistemas hidrofóbicos. Además, se analizan los sistemas de descongelación utilizados para combatir la acumulación de hielo en vuelo.

6. **Comparación y evaluación de sistemas de protección:** se lleva a cabo una comparación crítica de los diferentes sistemas de protección contra el hielo y de descongelación disponibles en términos de eficacia, complejidad y aplicabilidad en diversas situaciones climáticas.
7. **Aplicación práctica y estudios de caso:** se presentan ejemplos de casos reales en los que el helamiento ha tenido un impacto en la seguridad y operatividad de aeronaves. Se analizan cómo las estrategias de prevención y mitigación han sido aplicadas en estas situaciones y su efectividad.
8. **Conclusiones y futuras investigaciones:** se resumen los hallazgos clave de la investigación y se destaca la importancia de abordar el helamiento en aeronaves. Se identifican áreas que requieren investigaciones futuras y posibles innovaciones en la prevención y mitigación del helamiento.

Mediante esta metodología, se pretende ofrecer una comprensión exhaustiva y sólida del fenómeno de helamiento en aeronaves, sus mecanismos, efectos y estrategias para enfrentarlo.

Mecanismos de formación de hielo en las aeronaves

La formación de hielo en las aeronaves ocurre por condiciones atmosféricas frías y húmedas. El hielo se acumula en diversas áreas que afectan el rendimiento y la seguridad de la aeronave, este tiene la capacidad de cambiar la configuración aerodinámica del avión en pocos segundos, afectar los controles de vuelo y por esta razón conducir incluso a la muerte (Vivas, 2016). Por lo tanto, es de vital importancia conocer los mecanismos de formación de hielo que permitan tener un protocolo de prevención y actuación frente a este problema. Esta acumulación de hielo es producida generalmente a partir de las siguientes condiciones.

Cuando en las aeronaves una parte de su estructura está a una temperatura por debajo del punto de congelación del agua (por lo general, 0 °C y 1atm de

presión), si impacta agua líquida en ella, puede formar hielo (EASA, 2017). Cuando la aeronave se encuentra en vuelo, el hielo tiende a formarse cerca del borde de ataque de los planos, el parabrisas, antenas, entradas del motor y hélices (Vivas, 2016). Las gotas de agua en suspensión en las nubes con una temperatura por debajo del punto de congelación del agua no siempre se convierten en hielo. Si no hay partículas alrededor de las cuales puedan formar hielo, las gotas de agua pueden permanecer sobre enfriadas en forma líquida hasta una temperatura de -40 °C (EASA, 2017). Estas gotas de agua sobreenfriadas se encuentran frecuentemente en nubes convectivas con temperaturas desde justo por debajo del punto de congelación, hasta temperaturas de unos -10 °C. Llamamos nubes convectivas a las que se han formado debido al fenómeno de la convección, pueden llegar hasta el nivel de la tropopausa (zona de transición entre la troposfera y la estratosfera, que se sitúa entre los 9 km y 17 km de altitud), como resultado de un fuerte calentamiento. En relación con lo anterior, las corrientes convectivas son creadoras de nubes copiosas llamadas cúmulos. También pueden formar nubes tormentosas llamadas cumulonimbus (Švancárová y Jarošová, 2022). Los cúmulos tienen aspecto de colinas o torres. Están formados por gotas de agua primarias, pero en sus puntas también podemos encontrar cristales de hielo. Por lo general, la lluvia suele caer de los cúmulos y estos son anteriores a las nubes de tormenta. Pueden tener grandes proporciones, pero también pueden ser pequeñas (Švancárová & Jarošová, 2022). Las nubes convectivas por excelencia son los cumulonimbus (Cb, por su abreviatura), que son las que se encuentran en la etapa última del desarrollo de un cumulus (Cu, por su abreviatura). Su definición, según la Organización Meteorológica Mundial y que se encuentra expresado en (Alemán y Alomar, 2011, p 13):

Nube compacta y densa, con un desarrollo vertical considerable, en forma de montaña o de enormes torres. Parte de su cima es generalmente lisa, fibrosa o estriada, y casi siempre aplastada; esta parte se extiende a menudo en forma de yunque o de vasto penacho. Por debajo de la base de esta nube, a menudo

muy oscura, aparecen con frecuencia nubes bajas desgarradas, unidas o no con ella, y precipitaciones, a veces en forma de virga (que presenta un aspecto alargado y delgado, similar a un hilo o una cola que se extiende hacia abajo desde la nube principal).

Las nubes convectivas pueden ser extremadamente perjudiciales para las aeronaves, puesto que pueden producir peligros en ruta materializados en fenómenos tales como granizo, el propio helamiento, turbulencia y demás (Moreno, 2019). Es común encontrar altas concentraciones de agua líquida sobreenfriada en la parte superior de los cúmulos, que poseen un significativo desarrollo vertical y normalmente contienen una mayor proporción de gotas de agua sobreenfriada (EASA, 2017).

Se observa comúnmente que la condensación no ocurre en el punto de ebullición de la sustancia, y la congelación no ocurre en el punto de fusión de la sustancia, sino que requiere un exceso de subenfriamiento o superenfriamiento (Espinosa, 2019). Y es cuando esta agua sobreenfriada impacta con las superficies de la aeronave, que se convierte en estado sólido y genera acumulación de hielo en el borde de ataque de la aeronave, el estabilizador horizontal, la entrada de los motores y los sensores expuestos, como la sonda Pitot. Sin embargo, al momento del impacto de la gota con alguna parte de la aeronave, la gota no cristaliza inmediatamente, porque libera una cierta cantidad de calor que se enfrenta a la temperatura ambiente, lo que sumado al tamaño de la gota, afecta más o menos la velocidad de congelación (Retallack, 1984). La cantidad de gotas de agua determinarán el tamaño de la capa de hielo que se pueda conformar, así como su tamaño también influirá en la rapidez de solidificación.

Cabe resaltar que, a mayor tiempo de solidificación del hielo, este se formará con mayor resistencia y aumentará así el peligro, debido a la dificultad para eliminarlo una vez haya sido creado (Vivas, 2016). La presencia de ciertas partículas existentes en la atmósfera facilita la nucleación heterogénea de las gotas de agua super enfriadas al ayudar a superar las fuerzas de tensión superficial, favoreciendo la formación de cristales de hielo a temperaturas por debajo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ayón *et al.*, 2022). Lo que ocasiona que partículas en el aire como el polvo contribuyan a la formación de cristales de hielo en las nubes a partir de las gotas de agua sobreenfriadas.

Según la FAA (2015), en su reporte 91-74B, existen varios tipos de formación de hielo en aeronaves (figura 1) que se definen como:

- **Icing de formación:** también conocido como “icing claro”. Ocurre cuando el agua líquida se enfría y se congela al entrar en contacto con la superficie de una aeronave a una temperatura inferior al punto de congelación. Este tipo de *icing* puede formar una capa de hielo lisa y transparente en la aeronave, lo cual puede afectar negativamente su rendimiento aerodinámico.
- **Icing de escarcha:** este tipo de formación de hielo ocurre cuando pequeñas gotas de agua en suspensión en el aire se enfrían y se congelan al entrar en contacto con la superficie de una aeronave a una temperatura inferior al punto de congelación. La escarcha resultante puede tener una apariencia rugosa y esponjosa, lo que puede alterar el flujo de aire sobre la aeronave y provocar una pérdida de sustentación.

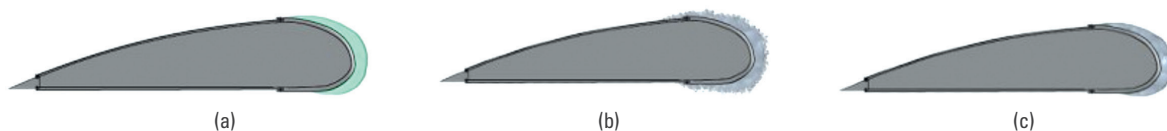


Figura 1. Tipos de formación de hielo en el ala
(a) *Icing* de formación, (b) *Icing* de escarcha y granulado, (c) *Icing* de cristales de hielo

Fuente: adaptado de FAA (2015, pp. 21-22).

- **Icing de nieve:** ocurre cuando la nieve se adhiere a la superficie de una aeronave. Esto puede suceder durante la precipitación de nieve o cuando la aeronave atraviesa una capa de nubes que contiene cristales de hielo. La acumulación de nieve en la aeronave puede aumentar su peso y alterar su perfil aerodinámico.
- **Icing de hielo granulado:** también conocido como “icing en ráfaga”, es similar al icing de escarcha. Se produce cuando pequeñas partículas de hielo en suspensión en el aire se adhieren a la aeronave. Estas partículas de hielo pueden tener forma irregular y causar una acumulación desigual en la superficie de la aeronave, lo que puede afectar su estabilidad y control.
- **Icing de cristales de hielo:** este tipo de formación de hielo ocurre en condiciones de nubes compuestas principalmente por cristales de hielo. Estos cristales pueden adherirse a la aeronave y formar una capa de hielo irregular. El icing de cristales de hielo es un fenómeno complejo y puede tener un impacto significativo en la aeronave, especialmente en las zonas donde el flujo de aire es más lento.

A medida que la acumulación de hielo en las superficies y demás sistemas de la aeronave se incrementa, se experimenta una significativa pérdida de control y eficiencia. En primer lugar, la sustentación disminuye considerablemente, lo que a su vez reduce el ángulo de ataque seguro en el que la aeronave puede operar, dando lugar a un potencial riesgo. Según la Administración Federal de Aviación (FAA, 2015), el rendimiento de la aeronave solo se verá afectado si la acumulación de hielo persiste durante más de una hora. Además, es fundamental considerar el grosor del hielo, como se ilustra en la tabla 1, ya que este también influye en el

grado de severidad de la formación de hielo. Según Li *et al.* (2020, pg 8), “el rendimiento del vuelo no se verá gravemente afectado si la aeronave no permanece en un estado de formación de hielo prolongado, incluso en condiciones severas de formación de hielo”

Entonces, el grosor del hielo nos determinará el riesgo durante el vuelo, no dependerá de la tasa de formación, sino del espesor que este posea, el artículo presenta sus secciones con la premisa de entender la formación de hielo, para posteriormente compararla con los estudios recientes y definir posibles soluciones a este fenómeno que genera inconvenientes en el campo aeronáutico.

El estudio de la formación de hielo en las aeronaves abarca una gran importancia, la premisa de comprender los mecanismos de formación de hielo, sus características y su impacto en las superficies y sistemas de la aeronave es fundamental para desarrollar estrategias de prevención y mitigación. Como se ha mencionado, la acumulación de hielo en el ala y otras áreas críticas puede afectar la aerodinámica, disminuir la sustentación y alterar el control del avión. De allí que enfatizamos en el estudio detallado de la formación de hielo en las aeronaves, permitiendo el desarrollo de tecnologías y prácticas que minimicen los riesgos asociados a este fenómeno.

Técnicas de investigación

Existen diversas técnicas utilizadas para el estudio del fenómeno del *icing* en las aeronaves. Estas técnicas permiten comprender mejor los mecanismos de formación de hielo, evaluar su impacto en el rendimiento de la aeronave y desarrollar estrategias de prevención y mitigación. A continuación, se describen algunas de las técnicas más comunes:

Tabla 1.
Severidad del espesor del hielo

Nivel de severidad de la formación de hielo	Baja	Moderada	Alta	Severa
Espesor máximo (mm)	0.1-0.5	5.1-15	15.1-30	>30

Fuente: adaptado de Li *et al.* (2020).

Modelos y simulaciones numéricas

Hoy día este método de investigación es cada vez más común, gracias a sus costos reducidos para la realización de investigaciones, y por sus excelentes aproximaciones a la realidad, permitiendo estudiar el comportamiento del hielo en diferentes partes de la aeronave, evaluando su impacto en el rendimiento aerodinámico. Estos modelos ayudan a optimizar el diseño de la aeronave y los sistemas de protección contra el *icing*, por ejemplo, el estudio de Wu y Cao (2013), quienes simularon las gotas de las nubes y su interacción con las superficies de la aeronave utilizando aproximaciones a soluciones de las ecuaciones Euler-Lagrange, demostrando la influencia en vuelo.

Acompañado además de modelos de simulación por computadora que consideran factores como la temperatura, la velocidad del aire, la geometría de la aeronave y las características del hielo, resultados que ayudan a comprender el fenómeno y guiar el diseño de sistemas de protección contra el *icing*, un claro ejemplo es el estudio de Li *et al.* (2020), que a partir del uso de un algoritmo de aprendizaje automático entrenado (*machine learning*, en inglés), simularon la formación de hielo sobre el borde de ataque de un perfil simétrico NACA 0012, donde después de comparar los resultados obtenidos con datos experimentales, obtuvieron muy buenas predicciones por parte del algoritmo.

Uno de los problemas de este tipo de métodos de estudio se origina al estar limitado a la complejidad del caso de estudio, en el sentido que hoy en día las aeronaves ya no utilizan perfiles simétricos, entonces su aplicación en la industria es limitada. Sin embargo, el uso del perfil simétrico permite que los cálculos en la formación de hielo no sean tan complejos, permitiendo corregir el algoritmo, lo que no sería más factible para perfiles asimétricos.

Vuelos de investigación

Se utilizan aeronaves especialmente equipadas con instrumentos de medición para recolectar datos en tiempo real durante vuelos en condiciones de formación de hielo. Estos vuelos permiten obtener información

detallada sobre la distribución de las condiciones meteorológicas y la acumulación de hielo en la aeronave. Los datos recopilados se utilizan para mejorar la comprensión del fenómeno y validar modelos de simulación. Este método es considerado el pionero en el estudio de la formación de hielo en aeronaves, fe de ello se evidencia en uno de los primeros estudios de *icing* en aeronaves, dirigido por la NASA (Wu y Cao, 2013, p. 3).

Donde se utilizó un DHC-6 twin otter, un avión bimotor turbohélice, con el cual les fue posible realizar la toma de datos en tiempo real del comportamiento aerodinámico del avión cuando se acumulaba hielo en las superficies de control de este, el estudio conducido por Potapczuk, Mark (2013) les permitió generar soluciones al *icing* en aeronaves que para ese entonces había sido causa de más de 542 accidentes de avión.

Túneles de viento

Los túneles de viento se utilizan para simular condiciones de vuelo y estudiar el comportamiento del hielo en diferentes partes de la aeronave. Mediante la generación controlada de condiciones de formación de hielo, se pueden evaluar los efectos aerodinámicos y estructurales de la acumulación de hielo en la aeronave. Esto ayuda a diseñar sistemas de protección contra el *icing* y optimizar la geometría de las superficies de la aeronave para minimizar la acumulación de hielo. Un ejemplo es el estudio de Shi *et al.* (2021), que demuestra las diferentes formaciones de hielo, en el ala.

Pruebas en laboratorio

Se realizan pruebas en laboratorio utilizando modelos a escala reducida o secciones de aeronaves para estudiar el comportamiento del hielo en condiciones controladas. Estas pruebas permiten analizar las características físicas del hielo, como su adherencia, estructura y resistencia, así como evaluar la eficacia de los sistemas de protección contra el *icing*. Por ejemplo, Ma *et al.* (2021) condujeron un estudio de capas para la mitigación de la formación de hielo en los bordes de ataque del ala de una aeronave, usando un túnel

de viento tipo *icing*, que se encuentra en el *Advance Flow Diagnostics & Experimental Aerodynamics Laboratory*, de la Iowa State University; uno de los pocos laboratorios que estudian el *icing* sobre las aeronaves, del mundo.

Investigación teórica y experimental

Se realizan estudios teóricos y experimentales para analizar los mecanismos físicos involucrados en la formación de hielo en aeronaves. Esto incluye la investigación de la termodinámica de las nubes, el proceso de nucleación y crecimiento de los cristales de hielo, y la interacción entre el hielo y la superficie de la aeronave. Estos estudios proporcionan conocimientos fundamentales sobre el fenómeno del *icing* y guían el desarrollo de tecnologías y estrategias de prevención. Por ejemplo, el libro de Pruppacher y Klett, (2010) aborda los procesos de nucleación y formación de nubes, además de su composición e interacción con el medio, con esto es posible entender de forma esencial el fenómeno y dar posibles soluciones.

Sistemas antihielo y deshielo

En determinadas condiciones atmosféricas la formación de hielo puede producirse rápidamente en superficies de control, así como en entradas de aire, por lo que estudios experimentales como los de Andreev y Bogatyrev (2014), hacen posible la idea de la prevención y eliminación más precisa de la formación de hielo en una aeronave, así como los sistemas para implementarse a partir de una clasificación de aeronaves, considerando el “grado de necesidad e instalación óptima del sistema de protección contra hielo” (IPS, por sus siglas en inglés), en función de las condiciones atmosféricas en las que una aeronave se someta sin que el funcionamiento de estos sistemas se vea afectado, y pueda mantenerse el rendimiento y control en vuelo. La idea de una predicción del engelamiento que se causa sobre una superficie es inexacta, debido a la imposibilidad de la toma de dimensiones y

densidad de todas las gotas de agua que lleguen a haber al atravesar las nubes (Vivas, 2016). Sin embargo, es posible evitar el engelamiento identificando su mecanismo de acción para así minimizar sus efectos (Cáceres, 2017). Así como determinar las zonas de mayor riesgo de engelamiento para de esta forma huir mediante un vuelo a distinto nivel o con el accionamiento de los sistemas de protección contra hielo (Vivas, 2016). Dichos sistemas de protección pueden clasificarse en tres procedimientos: **mecánicos, térmicos y químicos**.

Los **sistemas térmicos** utilizan fuentes de calor, ya sean: energías eléctricas, fuentes calefactoras y/o el aire caliente del motor que son distribuidas a través de las superficies de control y estos pueden actuar como sistemas antihielo o deshielo, según la función que se desee satisfacer en vuelo. En contraste con el IPS de pulsos, este sistema tiene un consumo considerable, sin embargo, tiene más variedades en las configuraciones de aplicación; estos sistemas usualmente se utilizan en los *slats*, en las alas, en los estabilizadores y en las entradas a los motores (FAA, 2015).

Los **sistemas de pulsos**, según la FAA: deshuelan las superficies utilizando pulsos de energía que generan movimientos rápidos de flexión en la superficie de la piel del avión, rompiendo el hielo acumulado (FAA, 2015, pp. 21-22). Se sabe que este es el menos utilizado en la industria por su complejidad, este sistema es capaz de romper la adhesión del hielo sobre las superficies, además de mantener la forma aerodinámica del ala, permitiendo que las características aerodinámicas de esta no se vean afectadas.

No requieren una fuente de calor constante, por lo que son óptimas para reducir el consumo de energía. Este sistema tiene un consumo considerable, sin embargo, tiene más variedades en las configuraciones de aplicación; estos sistemas usualmente se utilizan en los *slats*, en las alas, en los estabilizadores y en las entradas a los motores

Los **sistemas neumáticos** consisten en tubos de goma ubicados a lo largo del ala o estabilizador de la aeronave, estos se encuentran succionados por una bomba de vacío, para evitar interrupciones en el flujo a través del ala, al momento de formarse el hielo en la

aeronave, selectivamente o de forma intermitente, la bomba los infla para lograr romper la capa de hielo (figura 2).

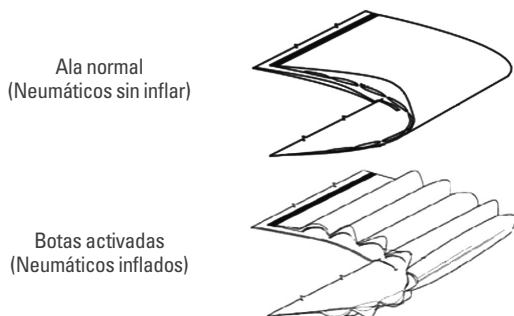


Figura 2. Funcionamiento del sistema neumático en aeronaves
Fuente: adaptado de FAA (2015, pp. 21-22).

Los **sistemas químicos** son procedimientos que se usan para descongelar hélices y cristales de cabina; se basan en las propiedades que presentan ciertas sustancias para bajar el punto de congelación del agua, y evitan de igual manera la formación de hielo y la disolución de este una vez formado sobre la estructura del avión (Retallack, 1984). Consta de una bomba que impulsa un anticongelante químico a través de las tuberías y conductos ubicados cerca de las áreas críticas. Estos están diseñados de manera que el fluido se distribuya uniformemente sobre las superficies que deben mantenerse libres de hielo.

Actualmente existen muchos métodos para prevenir o fracturar el hielo, como el sistema antihielo, el cual fue diseñado para prevenir la acumulación de hielo, este entra en funcionamiento antes de que se forme el hielo sobre superficies críticas de la aeronave. Por otro lado, el sistema de deshielo cuenta con botas neumáticas diseñadas para la eliminación de hielo después de estar acumulado, usualmente en las alas, los estabilizadores y los bordes de ataque.

Es importante tener en cuenta que el sistema de calefacción eléctrica de deshielo y antihielo en las aeronaves es solo una medida temporal para evitar la formación de hielo. En condiciones de precipitación continua, se requerirán otros métodos, como el uso de sistemas de pulverización de líquido deshielante o el

cambio de altitud, para evitar que el hielo se acumule en las aeronaves.

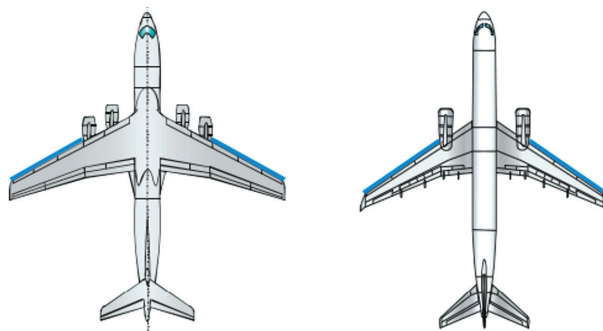
Según Andreev y Bogatyrev (2014), las zonas más afectadas son los bordes de ataque de las alas y los estabilizadores, los extradós e intradós del ala, ventanas de la cabina de los pilotos y en tubos *pitot*.

Los autores plantean una clasificación por grupos en función de las distancias operativas y tipos de alas; a partir de los cuales obtienen un acercamiento a la ubicación de formación de hielo, así como la ubicación de los sistemas de protección, estos grupos son:

- **Grupo I:** aeronaves de larga distancia y carga pesada con alas en flecha (figura 3).
- **Grupo II:** aeronaves de medio alcance con alas en flecha (figura 3).
- **Grupo III:** aeronaves de corto alcance con alas en flecha (figura 4).
- **Grupo IV:** aeronaves turbohélice de corto alcance con alas rectas (figura 4).
- **Grupo V:** aeronaves turbohélice con alas rectas para aerolíneas locales y transporte ligero (figura 5).
- **Grupo VI:** aeronaves de aviación general (figura 5).

Figura 3. Aeronaves de grupo I, II y ubicación de los IPS

Grupo I y Grupo II



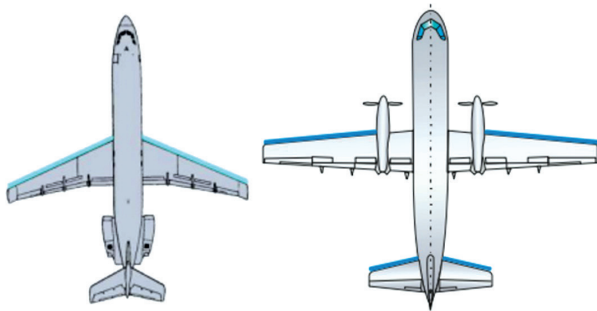
Fuente: adaptado de Andreev y Bogatyrev (2014).

Los grupos I y II (figura 1) utilizan un **sistema térmico** y un **sistema de pulsos**, ubicados parcialmente sobre las alas.

Todos los sistemas se aplican en una aeronave, principalmente considerando el grado de necesidad, esto debido a los consumos adicionales de energía y mantenimiento (Andreev y Bogatyrev, 2014).

Figura 4. Aeronaves de grupo III, IV y ubicación de los IPS

Grupo III y Grupo IV

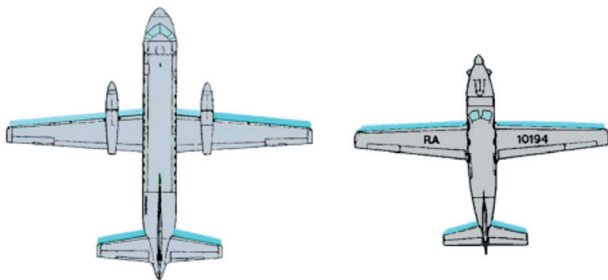


Fuente: adaptado de Andreev y Bogatyrev (2014).

El grupo III utiliza únicamente un **sistema térmico**, por otra parte, el grupo IV utiliza un **sistema térmico** y un **sistema de pulsos**.

Figura 5. Aeronaves de grupo V, VI y la ubicación de los IPS

Grupo V y Grupo VI



Fuente: adaptado de Andreev y Bogatyrev (2014).

El grupo V utiliza **sistemas térmicos** y **neumáticos**, por otra parte, el grupo IV utiliza un **sistema térmico** y un **sistema de pulsos**.

Nuevas tecnologías

Se han desarrollado técnicas y sistemas de detección para identificar la presencia de condiciones de formación de hielo y su acumulación en aeronaves. Estos incluyen sensores y dispositivos de medición utilizados tanto en vuelo como en tierra, por ejemplo, el estudio realizado por Wei, *et al.* (2019), donde utilizan sensores ultrasónicos para medir el grosor de la capa de hielo, este tipo de sistemas acompañados de resultados obtenidos por las simulaciones hechas en CFD o por simulaciones numéricas, que se ajustan bastante a las condiciones que sufre el avión, puede dar como resultado sistemas de protección más efectivos, con mejores resultados.

Resultados y métodos

Los resultados de este estudio revelaron una comprensión sólida y detallada del fenómeno de helamiento en aeronaves, en línea con los objetivos establecidos. Se logró una identificación precisa de los mecanismos de formación de hielo, junto con una descripción detallada de los factores que contribuyen a su desarrollo.

En términos de la clasificación de los tipos de helamiento, se establecieron categorías claras y definidas, considerando las características físicas y las condiciones atmosféricas asociadas con cada tipo. Se determinó que ciertas condiciones climáticas, como temperaturas cercanas a cero grados Celsius y alta humedad, favorecen la acumulación de hielo en las superficies de la aeronave.

Las zonas críticas vulnerables al helamiento fueron identificadas con precisión, incluyendo las alas, los estabilizadores y las superficies de control. Se comprendió cómo la acumulación de hielo en estas áreas puede afectar la estabilidad y el rendimiento de la aeronave, poniendo en peligro la seguridad de los vuelos.

Las estrategias de prevención y mitigación del helamiento fueron exploradas exhaustivamente. Se evaluaron sistemas de protección contra el hielo, como la calefacción de superficies y los sistemas hidrofóbicos,

así como sistemas de descongelación. Los resultados resaltan la importancia de la elección de sistemas adecuados según las condiciones climáticas y el tipo de helamiento.

En la comparación de sistemas de protección contra el hielo, se evidenciaron diferencias en términos de eficacia y complejidad. Se observó que ciertos sistemas eran más efectivos en condiciones específicas, lo que subraya la necesidad de considerar factores contextuales al implementar estrategias de protección.

Métodos

- a) **Revisión bibliográfica:** se llevó a cabo una búsqueda de literatura científica, libros especializados y publicaciones relevantes sobre el helamiento en aeronaves. La revisión se realizó en inglés y en español para asegurar la inclusión de fuentes pertinentes.
- b) **Clasificación y análisis de tipos de helamiento:** se analizaron casos de helamiento en distintos tipos de aeronaves y condiciones climáticas. Se categorizaron los tipos de helamiento y se describieron sus características físicas y condiciones asociadas.
- c) **Análisis de condiciones atmosféricas:** se recopiló datos climáticos relacionados con la formación de hielo en aeronaves. Se evaluaron parámetros como temperatura, humedad y altitud para identificar patrones asociados al helamiento.
- d) **Identificación de zonas críticas:** se estudiaron manuales técnicos de aeronaves y se consultaron expertos en aeronáutica para identificar las áreas más vulnerables al helamiento y comprender su impacto en el vuelo.
- e) **Exploración de estrategias de prevención y mitigación:** se analizaron sistemas de protección contra el hielo existentes y se evaluó su aplicabilidad en diferentes escenarios. Se investigaron técnicas de calefacción de superficies y sistemas de descongelación.
- f) **Comparación de sistemas de protección:** se realizó una comparación detallada de los sistemas

de protección contra el hielo en función de su eficacia y complejidad. Se utilizaron datos reales y simulaciones para evaluar su desempeño.

La combinación de estos métodos permitió alcanzar los objetivos propuestos y generar conocimiento valioso sobre el helamiento en aeronaves, desde su formación hasta las estrategias para enfrentarlo.

Conclusiones

La formación de hielo en aeronaves es un fenómeno climático peligroso que puede afectar significativamente la seguridad y el rendimiento de las aeronaves. Durante el vuelo, las aeronaves están expuestas a diversas condiciones meteorológicas, incluyendo temperaturas bajas y presencia de nubes y precipitación. Estas condiciones pueden propiciar la formación de hielo en la superficie de la aeronave, lo cual puede comprometer la capacidad de vuelo y la estabilidad aerodinámica.

El estudio del fenómeno de *icing* ha sido objeto de una amplia investigación científica y técnica. Los expertos han buscado comprender los mecanismos físicos que están involucrados en la formación de hielo en aeronaves, así como desarrollar técnicas y sistemas de protección efectivos para prevenir o mitigar sus efectos.

Varias fuentes bibliográficas han abordado el tema del *icing* en aeronaves, proporcionando información valiosa sobre los diferentes aspectos relacionados con este fenómeno.

El fenómeno del *icing* en aeronaves ha sido objeto de una amplia investigación científica y técnica en las últimas décadas. Los estudios se han centrado en comprender los mecanismos físicos de formación de hielo, desarrollar técnicas de detección y prevención, así como mejorar el diseño y funcionamiento de sistemas de protección contra el *icing*. A continuación, se presenta un estado del arte sobre la investigación en *icing aircraft*, junto con referencias bibliográficas relevantes.

Referencias

- Adsuar, J. C. (2003). *Meteorología: conocimientos teóricos para la licencia de piloto* (2.ª ed.). Ediciones Parainfo.
- Alemán, J. J. y Alomar, M. (2011). *Convección atmosférica*. Asociación Canaria de Meteorología.
- Andreev, G. & Bogatyrev, V. (2014). *Investigation of icing effects on aerodynamic characteristics of aircraft at tsagi*. 29th Congress of The International Council of the Aeronautical Sciences.
- Ayón, A., Salomón, J., Llanes, J. y Sierra, L. (2022). *Pronóstico de engelamiento de aeronaves en la región de información de vuelos de Cuba*. *Ingeniería energética*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000300048&lng=es&tlng=pt
- Cáceres, R. (2017). *Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas*. Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.
- Comandancia Departamento del Ejército de Washington. (1982). *Meteorología para aviadores militares. Manual de operaciones n.º FM 1-230, DC, 14.1-14.19*.
- Cuesta, M. (1991). Cinco condiciones ambientales adversas para el vuelo. *Revista de Aeronáutica y Astronáutica*. <https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/5-condiciones-adversas.pdf>
- EASA. (2017). *Formación de hielo en vuelo. GA10*. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/24118/es#:~:text=Cuando%20en%20una%20aeronave%20una,general%2C%20es%20f%C3%A1cil%20de%20ver>
- Espinosa, J. (2019). *Nucleación de sólidos cristalinos por simulación*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=230047>
- FAA. (2015). *AC 91-74B, Pilot Guide: Flight in Icing Conditions*. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_91-74b.pdf
- Jeck, R. K. (1983). *A New Data Base of Supercooled Cloud Variables for Altitudes up to 10,000 Feet AGL and the Implications for Low Altitude Aircraft Icing*. FAA.
- Landsberg, B., Murphy, K., Bell, L., Ells, S. & Hummel, K. (2004). *Aircraft Deicing and Anti-icing Equipment*. AOPA Air Safety Foundation.
- Li, S., Qin, J., He, M. & Paoli, R. (2020). Fast Evaluation of Aircraft Icing Severity Using Machine Learning Based on XGBoost. *Aerospace*, 18.
- Ma, L., Zhang, Z., Gao, L., Liu, Y. & Hu, H. (2021). Bio-Inspired Icephobic Coatings for Aircraft Icing Mitigation: A Critical Review. *Progress in Adhesion and Adhesives*, 6, 171-201.
- Moreno, N. (2019). *Estructura metodológica para el estudio de imágenes satelitales en la identificación de nubes convectivas que surgen en la aviación*. <http://hdl.handle.net/11349/22529>
- Potapczuk, Mark. (2013). Aircraft Icing Research at NASA Glenn Research Center. *Journal of Aerospace Engineering*, 26, 260-276. 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000322.
- Pruppacher, H. & Klett, J. (2010). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Springer Science & Business Media.
- Retallack, B. J. (1974). *Compendio de meteorología. Volumen I, parte II. Meteorología aeronáutica*. Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Shi, L., Feng, F., Guo, W. & Li, Y. (2021). Research and Development of a Small-Scale Icing Wind Tunnel Test System for Blade Airfoil Icing Characteristics. *International Journal of Rotating Machinery*, 12.
- Švancárová, N. & Jarošová, M. (2022). *Impact of clouds on the aviation, práce a štúdie*. University of Žilina.
- Tan, W., Cao, Y. & Wu, Z. (2017). *Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety*. Aerospace Science and Technology.
- Vivas, E. O. (2016). ¿Cómo afecta el hielo el vuelo de un avión? *TecnoESUFA: Revista de Tecnología Aeronáutica*, 24. <https://publicacionesfac.com/index.php/TecnoESUFA/article/view/511>
- Wei, K., Yang, Y., Hongyan, Z. & Zhong, D. (2019). A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. *Wiley*, 25.
- Wu, Z. & Cao, Y. (2013). Numerical simulation of airfoil Aerodynamic Penalties and Mechanisms in Heavy Rain. *Advances in Mechanical Engineering*, 13.