

AVISO

De esta tesis solo se publica una versión reducida que contiene únicamente las primeras páginas.

El resto del contenido es bajo embargo, por solicitud de uno de los interesados en relación con el trabajo.



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA

San Luis Potosí, a 15 de enero de 2018

Dr. DIRK FREDERIK DE LANGE
Coordinador Académico del Posgrado en Ing. Mecánica.

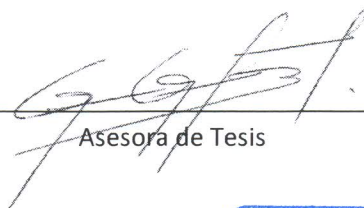
Estimado Dr.

Mediante la presente solicito, como Asesora de tesis del alumno de maestría ROBERT JÄCKEL, que no se publique en el repositorio del posgrado en internet y se evite la divulgación de su tesis titulada "Diseño de un tubo Pitot aeronáutico con un sistema de calefacción redundante incorporando materiales de cambio de fase".

El período a solicitar bajo reserva es de 5 años por recomendación del departamento de vinculación, por motivos de solicitud de patente.

Sin otro particular quedo atenta a cualquier comentario y agradezco de antemano su amable atención.

Atentamente



Asesora de Tesis



95
AÑOS DE
AUTONOMÍA
Primera Universidad
Autónoma de México

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS
POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE
POSGRADO

Design of an aeronautic Pitot probe with a
redundant heating system incorporating
Phase Change Materials

Diseño de un tubo Pitot aeronáutico con un
sistema de calefacción redundante
incorporando materiales de cambio de fase

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestro en ingeniería mecánica
Opción: Termofluidos

Presenta:
Ing. Robert Jäckel

Asesor:
Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta

Co-Asesor:
Dr. Fidencio Tapia Rodríguez



San Luis Potosí, S.L.P.

Enero de 2018

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



Aclaración

El presente trabajo que lleva por título

”Design of an aeronautic Pitot probe with a redundant heating system incorporating Phase Change Materials”

se realizó en el periodo de Enero de 2016 a Enero 2018 bajo la dirección de la Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta y del Dr. Fidencio Tapia Rodríguez.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este documento y asume la responsabilidad total del mismo.

Este documento no ha sido sometido como tesis a ningún otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento de tesis para fines académicos.

Robert Jäckel

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Maestría en Ingeniería Mecánica
Opción: Termofluidos



**DESIGN OF AN AERONAUTIC PITOT PROBE WITH
A REDUNDANT HEATING SYSTEM
INCORPORATING PHASE CHANGE MATERIALS**

Presenta:

Ing. Robert Jäckel

Sinodales:

Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta
Asesora

Dr. Fidencio Tapia Rodríguez
Co-asesor

Dr. Francisco Gerardo Pérez Gutiérrez
Revisor

Dr. Ricardo Romero Méndez
Revisor

Dr. Francisco Oviedo Tolentino
Suplente

San Luis Potosí, S.L.P., enero de 2018

Acknowledgements

To my supervisors, Geydy Gutiérrez and Fidencio Tapia for their patient guidance and constant support of my work.

To Juliana Loureiro, Renato and Carolina Cotta who gave me the opportunity to investigate in their research facility. What a place to work!! To Pedro Petindá, Leonardo Castellanos and Valter Yoshihiko Aibe, who constantly assisted my studies in the climatic wind tunnel. Agradeço-lhes muito.

To my compañeras Brenda Quistian and Rebeca Diaz-Santana for the team work, what a year!

To Hugo Oliva and Antonio Loredo for adopting me in their lab and the funny hours.

To *CONACYT*, who provided the funding of this the work.

Thanks for all your encouragement!

Abstract

In this work, an aeronautic prototype PP¹ with a redundant heating system incorporating PCM² was designed. In case of a heating failure, the PCM stabilizes the PP's temperature during its phase transition with the objective to enlarge the time frame for the pilot to respond to the problem. Therefore, ice formation on conventional PP was studied in a climatic wind tunnel. It was observed, that surface icing primarily occurs at temperatures below 0°C on the tip section, where it is capable to block the stagnation pressure port. Furthermore, the thermal response of the PP was characterized with *Infrared Thermography* under different ambient conditions. Using the *Flash Method*, its temperature-dependent material properties were obtained. Based on the experimental analysis, a conjugate heat transfer- model was created in CM³ to simulate the PP operation in flight conditions of a commercial aircraft. In this way, it was possible to predict the thermal response of the PP if a heating malfunction is encountered: 165 seconds after the heating element's power supply was cut off, the tip temperature undercuts the zero degrees Celsius mark, where the risk of icing is imminent. For the prototype design, after an application-related preselection and numerical analysis of the PCM material properties, eventually a commercial solution based on salt hydrates was chosen as heat storage for the prototype. A fractional factorial design, together with a multiple linear regression model was used to statistically determine how predefined design parameters can improve the prototypes's thermal response if a heating failure in flight conditions occurs. Finally, the prototype was characterised numerically in order to evaluate its viability for such case in CM. The simulations showed that after a heating failure, for the prototype it would take 359 seconds until its tip gets exposed to the risk of ice accretion, which is 121 per cent more time than in case of the conventional PP.

¹Pitot probe

²phase change material

³Comsol Multiphysics

Resumen

En este trabajo, se diseñó un prototipo de TP⁴ aeronáutico que incorpora un sistema de calefacción redundante, basado en MCF⁵. Para el caso de una falla de la calefacción eléctrica, el MCF estabiliza la temperatura del TP durante su cambio de fase con el objetivo de aumentar el lapso de tiempo del piloto para responder al problema. Se estudió experimentalmente la formación de hielo sobre un TP convencional en un túnel de viento climático. Se observó que el hielo se forma sobre todo a temperaturas bajo cero en la parte de la punta, donde es capaz de bloquear el puerto de presión de estancamiento. Asimismo, la respuesta térmica del TP fue caracterizada para diferentes condiciones ambientales, mediante *Termografía Infrarroja*. Usando el método *Flash*, se obtuvo las propiedades de sus principales materiales en función de la temperatura. Basado en el análisis experimental, un modelo de transferencia de calor conjugado fue creado en CM para simular la operación del TP en condiciones de vuelo de un avión comercial. De esta manera, fue posible predecir la respuesta térmica cuando se presenta una falla de la calefacción. Para tal caso, 165 segundos después de interrumpir la alimentación eléctrica, la temperatura en la punta cae por debajo de los cero Celsius, por lo que el riesgo de su congelamiento es inminente. Para el prototipo, después de una preselección con base a las limitaciones del diseño y una evaluación numérica de las propiedades del MCF, se seleccionó una solución comercial basada en hidratos de sal como almacenamiento térmico. Mediante un diseño fraccional factorial, en conjunto con una regresión lineal múltiple, se determinaron parámetros de diseño preestablecidos para optimizar la respuesta térmica del prototipo si una falla en el sistema de calefacción ocurre. Finalmente, el prototipo fue caracterizado numéricamente en CM con el objetivo de evaluar su viabilidad para dicho caso. Las simulaciones mostraron que debido al decremento de la temperatura en la punta del prototipo, el sensor corre el riesgo de acumular hielo después de 359 segundos, lo que significa un incremento del 121 por ciento, comparado con el caso del TP convencional.

⁴tubo de Pitot

⁵Materiales de Cambio de Fase

Contents

Introduction	1
Motivation	2
Justification	3
Objectives	4
General Objectives	4
Specific Objectives	4
Organization of this work	5
1 General aspects of aircraft icing and phase change	6
1.1 State of the art	7
1.1.1 Aircraft icing	7
1.1.2 Phase change materials	8
1.2 Theoretical framework	9
1.2.1 Icing hazard in aeronautics	9
1.2.2 Methods of Heat Storage	14
1.2.3 Fundamentals of Phase Transition	16
2 Experimental characterization of the AN5814 Pitot Probe	20
2.1 Overview of Activities- Chapter 2	21
2.2 General Characterization of the AN5814 Pitot Probe	21
2.2.1 Dimensions and Internal Structure	21
2.2.2 Material characterization using the Flash Diffusivity Method	23
2.3 Experimental Characterization in the Climatic Wind Tunnel	27
2.3.1 The Climatic Wind Tunnel in the NDIF	27
2.3.2 Basic Setup and Instrumentation	27
2.3.3 Characterization of the Test Section	30
2.3.4 Thermal Characterization with IR- Thermography	31
2.3.5 Ice Accretion Analysis	43
2.4 Conclusions of the Chapter	47
3 Numerical characterization of the AN5814 Pitot Probe	49
3.1 Overview of Activities- Chapter 3	50
3.2 Modelling of the Conjugate Heat Transfer	50
3.2.1 Physical Model Assumptions	50
3.2.2 Domain Definition	51
3.2.3 Governing Equations	52
3.2.4 Initial- and Boundary Conditions	54
3.2.5 Meshing	56

CONTENTS

3.3	Validation of the Model	57
3.3.1	Qualitative Analysis of the Numerical Results	57
3.3.2	Comparative Analysis between Experimental and Numerical Results	58
3.4	Simulation of Operation in Flight Conditions	61
3.5	Convergence Analysis	63
3.6	Conclusions of the Chapter	67
4	Design of an Aeronautic Pitot Probe with a Redundant Heating System Incorporating Phase Change Materials	68
4.1	Overview of Activities- Chapter 4	69
4.2	Implementation of the Phase Change Process in Comsol Multiphysics	69
4.2.1	Physical Model Assumptions	69
4.2.2	Governing Equations	70
4.3	Design of the prototype PP	72
4.3.1	Selection of a PCM	72
4.3.2	Parameter Design of the prototype PP using the DOE Method	77
4.4	Analysis of the PCM Containment Stress	91
4.5	Numerical characterization of the prototype PP	94
4.6	Conclusions of the Chapter	98
	Conclusions	100