



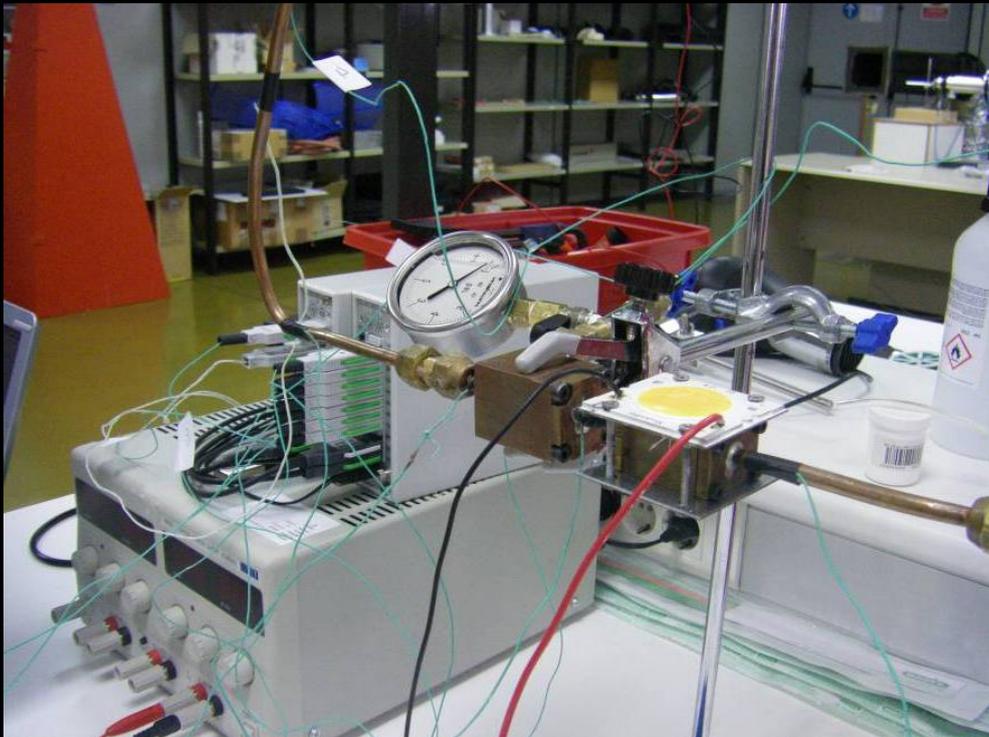
Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Bilbao

# DEVELOPMENT OF A LOOP HEAT PIPE "LHP" THERMAL SUPERCONDUCTOR DEVICE WITH MULTICONDENSORS



*Author*

**Jesús Esarte San Martín**

*Supervisors*

Jesús María Blanco Ilzarbe

José Tomás San José Lombera

July 2017, Bilbao



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Bilbao

# DEVELOPMENT OF A LOOP HEAT PIPE "LHP" THERMAL SUPERCONDUCTOR DEVICE WITH MULTICONDENSORS

*Author*

**Jesús Esarte San Martín**

*Supervisors*

Jesús María Blanco Ilzarbe

José Tomás San José Lombera

July 2017, Bilbao



AREA CIENCIA DE MATERIALES  
AREA MECANICA DE FLUIDOS  
AREA CONSTRUCCION

## ACKNOWLEDGEMENTS

Completing a PhD is truly a marathon event, and it would not have been accomplished without the aid and support of countless people over the last years. I must first express my gratitude towards my supervisor and director, Assistant professor Jesús María Blanco Ilzarbe for his patience and constant encouragement. It has not been an easy road and there have been many moments of difficulty that with the help of Jesus María have been overcome, so, many thanks. Thanks also to his constant technical guidance, without it this thesis had not been possible and concluded. After so long you have become a great friend and in the light that has guided me in this process. I would like also to thank to my co-director, Assistant professor José Tomás San José Lombera, for helping me with the same matters and also in all that arduous, ungrateful but necessary administrative work any thesis requires. You once told me that the day of the thesis defence is an enjoyment day and that the nerves of the occasion should be left out, the hard work was already done (execution of thesis). I thank you for such gratifying words, indeed this day should be a joy. Special gratitude to the **Research group IT781-13** for assistance and co-funding some of the activities directly related to this work.

I'd also like to thank the members of the tribunal who have valued my work and attend to my defence.

My internship at NEDO Laboratory in Cardiff University during part of my PhD has been an invaluable experience, and I appreciate the help, support, and the enjoyable working environment my colleagues at NEDO have provided. I especially thank to the deceased Professor Mikel Rowe for making my stay there easier. I am also specially grateful to Professor Gao Min for introducing me into the Thermoelectrics field and sharing all his knowledge on thermoelectric materials characterization, fabrication and assembly. After all, it has been the trigger for this thesis.

I would like also to thank all my lab mates and friends at CEMITEC for their friendship and moral support in such stressful times. I want to give a special mention to my colleague Angela Bernardini for her contributions to my research during my PhD years. Her ability to probe physics beneath the math is a true talent drives me through the complexity of the fluid mechanics in porous media.

Finally, I want to thank my family for their continued understanding and support during these years of stress and absence from home. Especial grateful is given to my wife, Neli Waltl, for his love and companionship, and for her patience and for giving me two marvellous sons, Alejandro and David. To my parents and brothers, for all the effort they have done so that I have been able to do my university career, always grateful.

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de una tesis es un ejercicio realmente maratónico y no habría sido posible sin la ayuda y el apoyo de una infinidad de personas durante estos últimos años. Quiero expresar primeramente mi gratitud a mi asesor y director, el profesor Jesús María Blanco Ilzarbe, por su paciencia y constante ánimo durante todo este proceso. No ha sido un camino fácil y ha habido muchos momentos difíciles, de altibajos los cuales han sido superados gracias al apoyo y aliento de Jesús María, así pues muchas gracias. Igualmente, agradecer su constante apoyo y orientación técnica sin ella la cual esta tesis no habría sido posible. Después de todo este tiempo te has convertido en un gran amigo y en la luz que me ha guiado durante todo el proceso de ejecución-redacción de la tesis. Así mismo doy las gracias a mi codirector, el profesor José Tomás San José Lombera, por ayudarme en los mismos términos y en todo ese arduo, ingrato pero necesario trabajo administrativo que cualquier tesis requiere. Una vez me dijiste que el día de la defensa de la tesis es un día para disfrute y que los nervios de la ocasión deben ser dejados de lado, lo difícil ya estaba hecho (ejecución de tesis). Te doy las gracias por tan gratificantes palabras, en verdad este día debe ser de júbilo. Especial agradecimiento al grupo de investigación IT781-13 por su ayuda y co-financiación de algunas de las actividades directamente relacionadas con este trabajo.

También quisiera dar las gracias a los miembros del tribunal que han valorado mi trabajo y han asistido a mi defensa.

Mi estancia en el Laboratorio NEDO de la Universidad de Cardiff durante una parte de mi doctorado ha sido una experiencia inestimable y agradezco la ayuda, el apoyo y el agradable ambiente de trabajo que mis colegas de NEDO me han proporcionado. Agradezco especialmente al fallecido profesor Mikel Rowe por hacer que mi estancia

fuera más fácil. También estoy especialmente agradecido al profesor Gao Min por haberme introducido en el campo de la termoeléctricidad y por compartir todo su conocimiento en el campo de la caracterización, fabricación y montaje de los materiales termoeléctricos. Después de todo, ha sido el desencadenante de esta tesis.

También quiero agradecer a todos mis compañeros y amigos de CEMITEC por su amistad y apoyo moral en tiempos tan agobiantes. Quiero hacer mención especial a mi compañera Angela Bernardini por sus contribuciones a mi investigación durante mis años de doctorado. Su visión de la física a través de la matemática es un talento que me ha guiado a través de la complejidad de la mecánica de fluidos en medios porosos.

Finalmente, quiero dar las gracias a mi familia por su comprensión y apoyo continuo durante estos años de estrés y ausencia. Doy las gracias especialmente a mi esposa, Neli Walth, por su amor y compañerismo, por su paciencia y por darme dos hijos maravillosos, Alejandro y David. A mis padres y hermanos, por todo el esfuerzo que han hecho para que yo haya podido realizar mi carrera universitaria, siempre agradecida.

Thesis: Development of a Loop Heat Pipe “LHP”  
thermal superconductor device with  
multicondensers

UNIVERSIDAD PAIS VASCO  
Dpto. INGENIERÍA MINERA Y METALÚRGICA  
Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

## Summary

Overheating is a critical factor in the functionality of many high power density electronic devices (microprocessors, telecommunications, solar cells, wind power, photovoltaic, electric traction systems, thermoelectric devices, etc.). The reliability, lifetime and efficiency of these devices are severely limited by the speed at which the heat generated during their operation is dissipated.

The electronic world nowadays evolves towards smaller devices and components with greater operating capacity and consequently with greater generation of heat (density of heat flow). This increase in heat flow together with the component miniaturization result in a cooling needs increase and therefore the power consumption associated therewith. As an illustrative example of the weight of refrigeration's power consumption on total power consumption, the study by EMERSON network power is shown, figure 1.

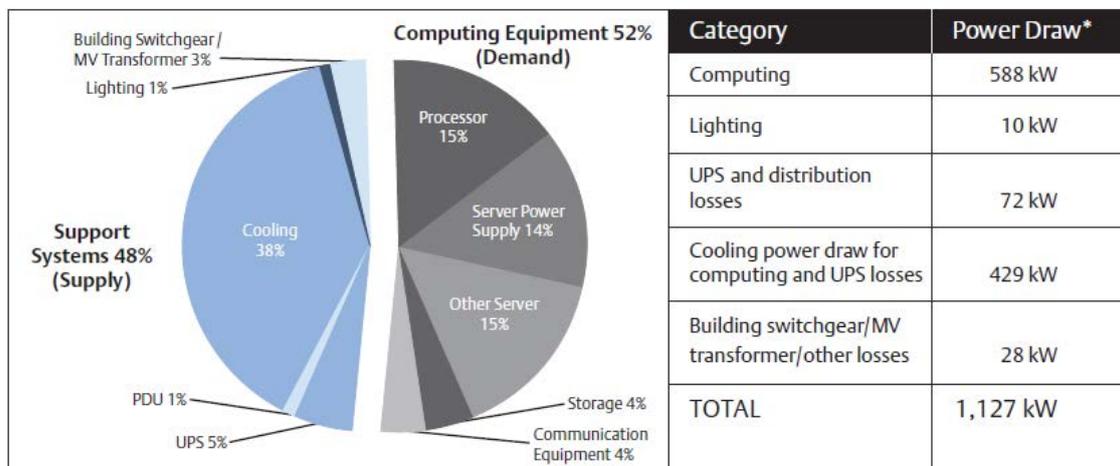


Figure 1. Analysis of a typical 5,000-square-foot data center shows that demand-side computing equipment accounts for 52 percent of energy usage and supply-side systems account for 48 percent.

\* This represents the average power draw (kW). Daily energy consumption (kWh) can be captured by multiplying the power draw by 24.

The study shows that 38% of the total power consumption of a 450 m<sup>2</sup> data centre is due to the cooling system. It seems obvious the need to improve cooling systems efficiency and / or reduce data centre power consumption, cascade effect. Effect due to which, a 1W power consumption reduction of a server leads to a 2.84W reduction of the data centre, figure 2.

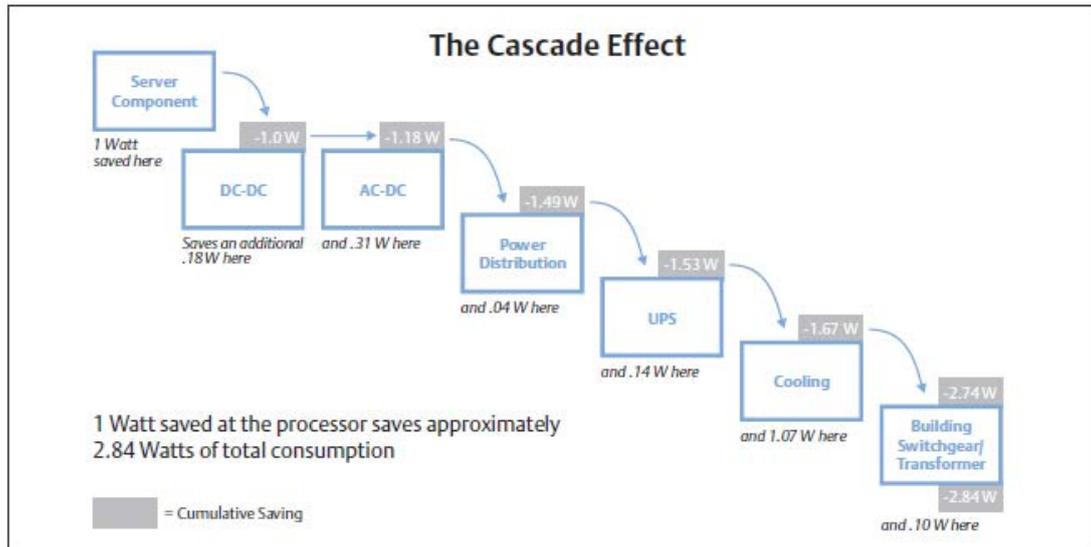


Figure 2. With the Cascade Effect, a 1-Watt savings at the server-component level creates a reduction in facility energy consumption of approximately 2.84 Watts.

However, reducing the component's consumption by 1W means reducing its operating temperature, ie increasing its refrigeration.

As for the Peltier thermoelectric devices, the fact of having an efficient heat extraction from both hot and cold sides directly influences the efficiency of the Peltier (cooling capacity or energy conversion capacity), figure 3.

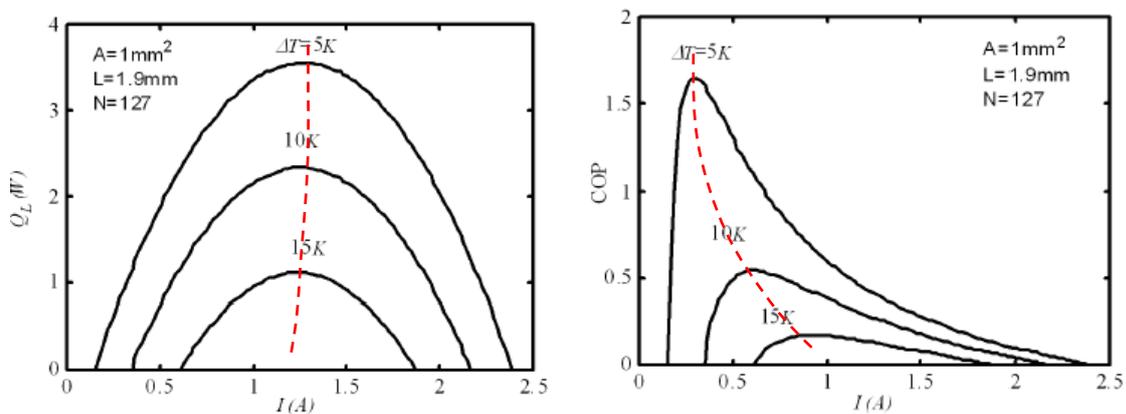


Figure 3: Evolution of the cooling capacity and efficiency as a function of the temperature rise

As the temperature difference between the hot and cold side of the Peltier increases, " $\Delta T$ ", the maximum cooling capacity " $Q_{L_{max}}$ " decreases and so does its COP (Coefficient of operation) " $COP_{max}$ ". This temperature rise " $\Delta T$ " is greater as greater the thermal resistance or efficiency of the heat extraction device placed on both sides of the Peltier (discussed in this thesis) is. It is therefore essential to improve the efficiency

of these cooling systems (heatsinks) in order to obtain the maximum of Peltier systems (either as a refrigerator or as a converter).

The above examples and many others in industrial refrigeration highlight the importance of efficient refrigeration technologies. However, as far as the world of electronics is concerned, there is a fundamental aspect when looking for efficiency in refrigeration and it is the high heat densities that occur in it. These high heat densities mean that traditional cooling systems (fin radiators) are not efficient. In this work, a rapid analysis of the influence of the radiator parameters on its thermal resistance is made.

The increase in the efficiency of refrigeration happens to extract more heat under the same temperature jump without that implies devices of great volume (not admitted in the electronic world). High heat extraction technologies with similar or slightly higher sizes than those of heat sources (electronic component, Peltier) are sought. In addition, they must ensure the minimum temperature difference between the hot spot (heat extraction) and the cold point (heat expulsion), devices such as the heat pipe "LHP". This work focuses on this type of device: performance, key parts and their improvement.

For this, a numerical model able to predict the LHP operation as a function of constructive parameters and dissipation needs has been developed. Likewise, the construction and testing of such a device have been carried out for the cooling of a 4cmx4cm surface device generating about 50W heat power.

Also, an analysis of the primary and secondary wick's behaviour and the importance of obtaining a very high capillary pumping is made. There are different technologies for the manufacture of these wicks, although the 3D Printing "SLM" technology has been used. This technology allows to create wicks with a customized internal structure and adapted to the thermal requirements, innovative part of the work.

## Resumen.

El sobrecalentamiento es un factor crítico en la funcionalidad de muchos dispositivos electrónicos de alta densidad de potencia (microprocesadores, telecomunicaciones, celdas solares, inversores eólicos, fotovoltaica, sistemas de tracción eléctrica, dispositivos termoeléctricos, etc...). La fiabilidad, vida útil y eficiencia de estos dispositivos están fuertemente limitadas por la velocidad a la que es disipado el calor que generan durante su funcionamiento.

El mundo electrónico hoy día evoluciona hacia dispositivos, componentes, más pequeños con mayor capacidad de operación y en consecuencia con mayor generación de calor (densidad de flujo de calor). Este incremento de flujo de calor unido a lo reducido del tamaño de los focos generadores hace que se incrementen las necesidades de refrigeración y por tanto los consumos ligados a ello. A modo de ejemplo ilustrativo del peso que la refrigeración tiene sobre el consumo total de operación, se muestra el estudio realizado por la empresa EMERSON network power, **figura 1**.

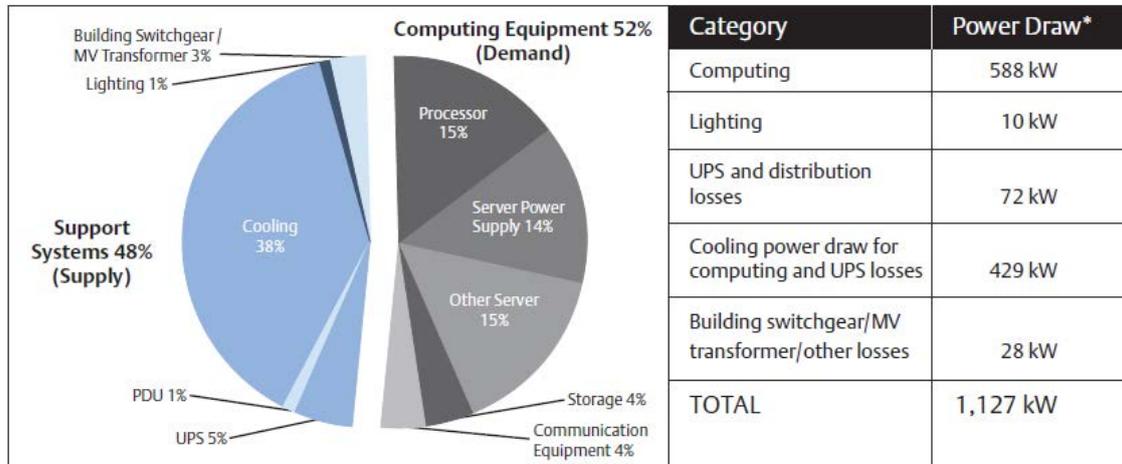


Figure 1. Analysis of a typical 5,000-square-foot data center shows that demand-side computing equipment accounts for 52 percent of energy usage and supply-side systems account for 48 percent.

\* This represents the average power draw (kW). Daily energy consumption (kWh) can be captured by multiplying the power draw by 24.

Del estudio realizado se comprueba que el 38% del consumo total de un centro de cálculo de 450 m<sup>2</sup>, es debido al sistema de refrigeración. Parece evidente la necesidad de mejorar la eficiencia en los sistemas de refrigeración y/o reducir los consumos del data center, **efecto cascada**. Efecto debido al cual, la reducción en 1W del consumo de un componente del servidor conduce a una reducción 2.84W en el consumo del centro de cálculo, figura 2.

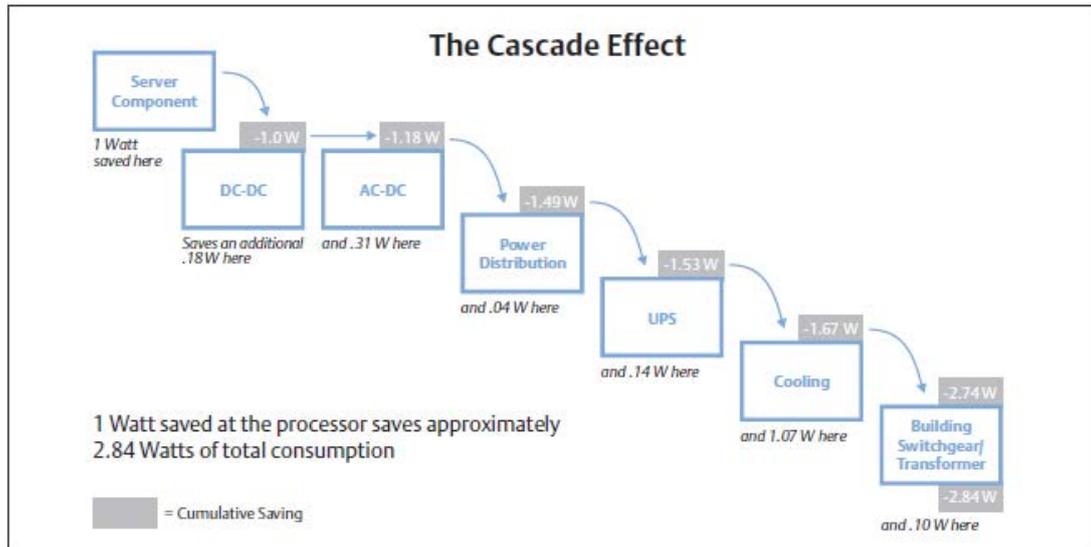


Figure 2. With the Cascade Effect, a 1-Watt savings at the server-component level creates a reduction in facility energy consumption of approximately 2.84 Watts.

Ahora bien, reducir 1W el consumo de un componente pasa por reducir su temperatura de operación, es decir, incrementar su refrigeración.

En cuanto a los dispositivos termoelectricos-Peltier el hecho de contar con una extracción de calor eficiente de sus focos tanto caliente como frío influye directamente en la eficiencia del Peltier (capacidad de refrigeración o de conversión de energía),

figura3

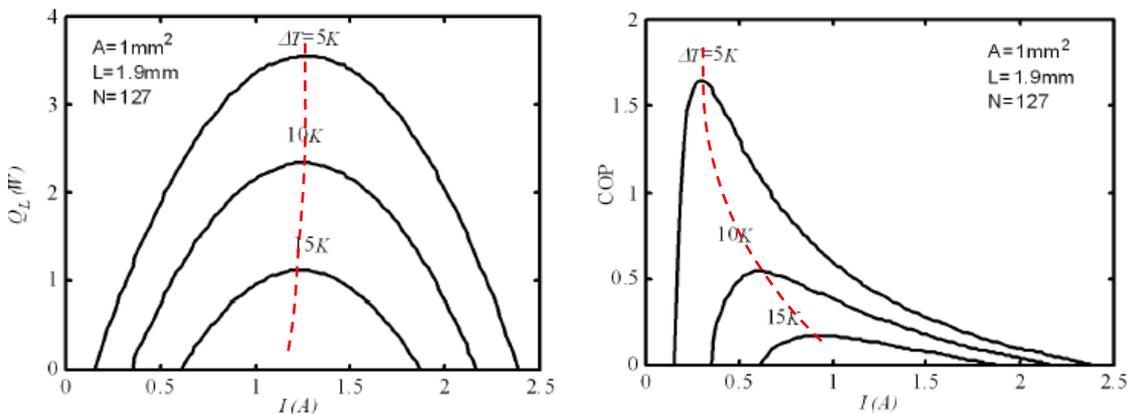


Figura 3: evolución de la capacidad frigorífica y eficiencia en función del salto de temperatura

A medida que la diferencia de temperatura entre lado caliente y frío del Peltier, “ $\Delta T$ ” aumenta, la capacidad máxima de refrigeración “ $Q_{Lmax}$ ” disminuye y lo mismo ocurre con su COP (coeficiente de operación) “ $COP_{max}$ ”. Este salto de temperatura “ $\Delta T$ ”, es mayor cuanto mayor la resistencia térmica o eficiencia del dispositivo de extracción de

calor colocado en ambas caras del Peltier (se analiza en esa tesis). Por consiguiente, es fundamental el mejorar la eficiencia de estos sistemas de refrigeración (disipadores) a fin de obtener el máximo de los sistemas Peltier (bien como refrigerador bien como conversor).

Los ejemplos anteriores y otros muchos dentro de la refrigeración industrial resaltan la importancia de contar con tecnologías de refrigeración eficientes. Sin embargo, en lo que al mundo de la electrónica, Pelteir se refiere, existe un aspecto fundamental a la hora de buscar la eficiencia en la refrigeración y es las elevadas densidades de calor que en él se producen. Estas altas densidades de calor obligan a que los sistemas tradicionales de refrigeración (radiadores de aletas) no sean lo todo eficientes que pueden ser. En este trabajo se hace un rápido análisis de la influencia de la configuración-diseño de un radiador sobre su resistencia térmica.

El incremento en la eficiencia de refrigeración pasa por extraer de forma eficiente las elevadas densidades de calor sin que ello implique dispositivos de gran volumen (no admitido en el mundo electrónico). Se buscan tecnologías de alta capacidad de extracción de calor con tamaños similares o ligeramente superiores a los de las fuentes de calor (componente electrónico, Peltier) y que supongan una mínima diferencia de temperatura entre el punto de extracción de calor y el punto expulsión del mismo. Dispositivos como los loop heat pipe “LHP”. Este trabajo se centra en este tipo de dispositivo: performance, partes clave y su mejora.

Para ello se ha desarrollado un modelo numérico capaz de reproducir el funcionamiento del dispositivo en función de parámetros constructivos y de necesidades de disipación. Así mismo se ha llevado a cabo la construcción y ensayo de tal dispositivo para la refrigeración de un dispositivo de 4x4cm y unos 50W de potencia térmica.

Así mismo se hace un análisis del comportamiento de los “wick” tanto primario como secundario de estos dispositivos y la importancia de la obtención de obtener una muy alta capilaridad. Existen diferentes tecnologías para la fabricación de estos wicks, si bien en este dispositivo se ha empleado el láser printing technology que permite crear los wicks con la estructura interna personalizada y adaptada a los requerimientos térmicos, parte innovadora del trabajo.

## **DEVELOPMENT OF A LOOP HEAT PIPE “LHP” THERMAL SUPERCONDUCTOR DEVICE WITH MULTICONDENSERS**

<b>Acknowledgments</b> .....	iii
<b>Summary</b> .....	vii
<b>Table of Contents</b> .....	xiv
<b>Chapter 1.- Thermal management in electronic component. Thermal challenges in Peltier module and LED</b>	
1.1- Introduction.....	2
1.2- Thermal challenges in Peltier pellets-LED.....	4
1.2.1- Peltier pellet. ....	4
Operating principle .....	4
Peltier pellet arrangement .....	5
Parameters influencing the performance of a Peltier pellet.....	6
1.2.2 Light emitting diode (LED). ....	10
Operating principle .....	10
LED Lamp Configuration.....	11
LED performance influent parameters. ....	11
1.3- Motivation.....	13
Bibliography.....	16
<b>Chapter 2.- Objectives and methodology</b>	
2.1- Objectives. ....	19
2.2- Thermal management challenges.....	19

2.2.1- Effect of the heat flow direction	20
2.2.2- Heatsink efficiency	22
2.3- Methodology and Contributions .....	33
Bibliography .....	33
<b>Chapter 3.- Capillarity in porous media</b>	
3.1 Introduction .....	37
3.2 Fluid-dynamic in a porous medium .....	39
3.2.1- Macroscopic mathematical approach. ....	40
3.2.2- Wick loading curve.....	44
3.2.3-Permeability .....	47
3.3. Experimental characterization.....	51
3.3.1- Loading curve .....	51
3.3.2- Permeability .....	59
Bibliography .....	65
<b>Chapter 4.- Development of a theoretical model of two-phase heatsink Loop Heat Pipe</b>	
4.1 Introduction .....	69
4.2 Model's Development.....	70
4.2.1- Brief description of the components:.....	72
4.2.2- Mathematical formulation .....	72
4.3 Results .....	84
4.3.1- Validation.....	84

4.3.2- Effect of vapour line length and radius. ....	88
4.3.3- Effect of condensing temperature.....	89
4.4 Conclusions .....	93
Bibliography.....	95
 <b>Chapter 5.- Manufacturing and experimental testing of the LHP</b>	
5.1 Introduction .....	99
5.2 Primary Wick .....	99
5.2.1-Permeability, “K” .....	101
5.2.2- Wettability- Capillary Pumping, “ $\varphi$ ” .....	102
5.2.3-Thermal conductivity “K” .....	105
5.3. Secondary Wick .....	106
5.3.1-Transport capacity “TC” .....	107
5.4. LHP-Results .....	110
5.4.1- Starting up.....	112
5.4.2- Charge of refrigerant.....	114
5.4.3- Condensation/ambient temperature. ....	116
5.5. Conclusions .....	119
Bibliography.....	121
 <b>Chapter 6.- Conclusion and Future works</b>	
6.1-Conclusions.....	124
6.2-Future works .....	127

## ANNEXES

1-Nomenclature .....	129
2-List of figures .....	132
3-List of tables .....	142
4-Refrigerant properties .....	144
5-Previous works .....	151
Porous media .....	152
HP prototypes .....	157
6-Brief CV of the author .....	162

# **Chapter 1 Thermal management in electronic component. Thermal challenges in Peltier module and LED.**

1.1- Introduction.....	2
1.2- Thermal challenges in Peltier pllets-LED.....	4
1.2.1- Peltier pellet.....	4
Operating principle .....	4
Peltier pellet arrangement .....	5
Parameters influencing the performance of a Peltier pellet.....	6
1.2.2 Light emitting diode (LED).....	10
Operating principle .....	10
LED Lamp Configuration.....	11
LED performance influent parameters. ....	11
1.3- Motivation.....	13
Bibliography.....	16

## 1.1- Introduction

Since the 1970s the semiconductor industry (electronics) has been driven by the so-called Moore's Law. Law, established in 1965 by George Moore, in which it was affirmed that the number of components that could be integrated in a printed circuit would grow exponentially in the time, which implied a manufacturing cost reduction (cost per unit) and allowed the manufacture of more complex circuits in a single semiconductor. Since 1970 the number of components per chip has been doubling every two years, Moore's law. For decades, this law has been the driving force of the semiconductor industry in particular and electronics in general thanks to the so-called virtuous cycle, **figure 1.1**. A cycle in which advances in integration (cost reduction, greater functionality) boost the semiconductor market and investments in new technologies that in turn increase integration and reduce costs [1].



Figure 1.1 Moore law

However, this continuous advancement has led to the so-called "*More than Moore*" technology which targets not only the transistor integration density increase (miniaturization-digital) but also the diversification of functions (non-digital) in the component.