



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA  
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
DISEÑO DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE  
CALOR EN MINEROS BITCOIN

Autor: Jorge Llinás Fernández

Director: Álvaro Pérez Bello

Codirector: Juan Montero

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Diseño de sistemas de recuperación de calor en mineros Bitcoin  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

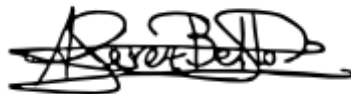
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Jorge Llinás Fernández

Fecha: 24/ 08/ 2023

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Álvaro Pérez Bello

Fecha: 31/ 08/ 2023





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA  
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
DISEÑO DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE  
CALOR EN MINEROS BITCOIN

Autor: Jorge Llinás Fernández

Director: Álvaro Pérez Bello

Codirector: Juan Montero

Madrid



# **DISEÑO DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN MINEROS BITCOIN**

**Autor: Llinás Fernández, Jorge.**

Director: Pérez Bello, Álvaro.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas, SIROEXMON LABS

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

El presente proyecto pretende encontrar una solución a las emisiones caloríficas que emiten los mineros de criptomonedas. Se ha demostrado como el calor generado por estos mineros es reutilizable en aplicaciones de baja y alta temperatura.

**Palabras clave:** Bitcoin, ASIC, Dieléctrico, Bomba de calor

### **1. Introducción**

Este proyecto surge de la necesidad de aumentar la eficiencia del proceso de minado de las criptomonedas, que, desde la aparición del bitcoin en 2009, no ha parado de evolucionar. Esta evolución va ligada proporcionalmente al precio de mercado de las criptomonedas, ya que a medida que aumenta el valor del activo más capital atrae. En el caso del Bitcoin, a medida que aumenta su precio, aumenta también proporcionalmente el consumo de energía utilizada en su minado (Vries).

### **2. Definición del proyecto**

El trabajo busca obtener la viabilidad técnico-económica de un sistema de recuperación de calor que aproveche el calor generado por una estación de minado de criptomonedas. Para ello se pretende conseguir la configuración más adecuada de intercambiador y fluido para el intercambio de calor.

### **3. Descripción del modelo**

El modelo consta de dos configuraciones, configuración de baja y configuración de alta temperatura. En la Ilustración 1, se muestra la configuración de alta temperatura, donde se puede ver el circuito de recuperación de calor de los mineros, conectado a un circuito secundario en configuración de bomba de calor.

Dicho circuito pretende recuperar el calor generado por una estación de minería, aumentar su temperatura a través de la bomba de calor y darle un uso industrial o doméstico a dicho calor.

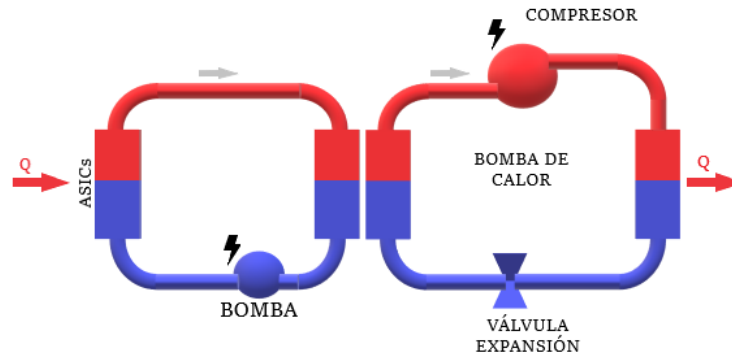


Ilustración 1: Esquema del sistema con bomba de calor

El modelo pretende adaptarse a las diferentes aplicaciones posibles, pudiendo ser utilizado en todas las aplicaciones de calor posibles.

#### 4. Resultados

El estudio, busca comprobar la viabilidad económica del proyecto. Por ello, se han obtenido las diferencias en los periodos de recuperación de la inversión, según la variabilidad de los parámetros de entrada.

En la Ilustración 2, se muestra el PRI según un posible aumento y disminución del precio de la energía eléctrica. Se observa como a precios actuales de la energía, la inversión en un sistema de recuperación de calor para una aplicación de alta temperatura se recupera de media en aproximadamente 4 años.

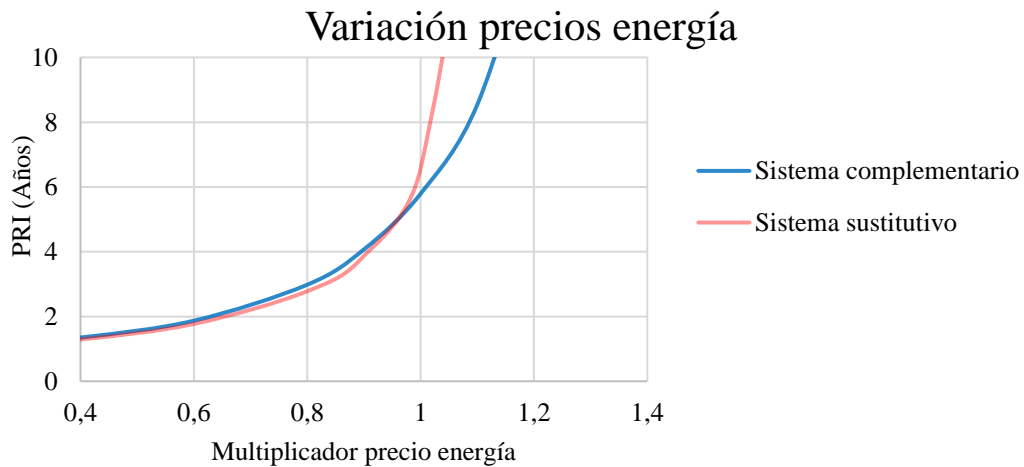


Ilustración 2: Rentabilidad de la instalación según precio de la electricidad – sistema 2.

#### 5. Conclusiones

El proyecto demuestra la viabilidad económica de los sistemas de recuperación de calor presentados. Estos resultados son de particular importancia en la industria del minado de criptomonedas, ya que el calor desechado en los procesos de minado podría



ser rentabilizado y dado un uso, aumentando así la rentabilidad económica de la inversión.

## **6. Referencias**

- [1] Vries, A. (n.d.). *ScienceDirect*. Retrieved 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121000830>



# DESIGN OF HEAT RECOVERY SYSTEMS IN BITCOIN MINERS

**Author: Llinás Fernández, Jorge.**

Director: Pérez Bello, Álvaro.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas, SIROEXMON LABS

## ABSTRACT

This project aims to find a solution to the heat emissions emitted by cryptocurrency miners. It has been proven that the heat generated by these miners can be reused in low and high temperature applications.

**Keywords:** Bitcoin, ASIC, Dielectric, Heat pump

### 1. Introduction

This project stems from the need to increase the efficiency of the cryptocurrency mining process, which, since the appearance of Bitcoin in 2009, has had a continuous evolution. This development is linked proportionally to the market price of cryptocurrencies, since as the value of the asset increases, more capital is attracted. In the case of Bitcoin, as its price increases, so does the energy required to mine it (Vries).

### 2. Project definition

The work seeks to obtain the technical and economic feasibility of a heat recovery system that takes advantage of the heat generated by a cryptocurrency mining station. The aim is to achieve the most appropriate configuration of a heat exchanger system with the proper coolant.

### 3. Description of the model

The model consists of two different configurations, low and high temperature configuration. Figure 3 shows the high-temperature configuration, where you can see the miners heat recovery circuit, connected to a secondary circuit, a heat pump.

The hole circuit aims to recover the heat generated by a mining station and increase its temperature through the heat pump to make use of it in an industrial or domestic application.

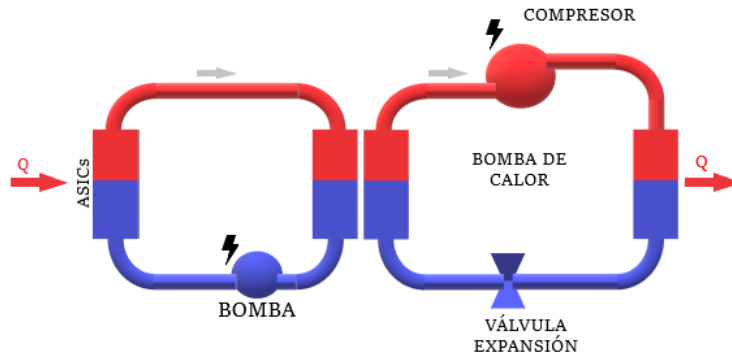


Figure 3: Scheme of installation with a hot pump

The model aims to adapt to the different possible applications, being able to be used in all possible heat applications.

#### 4. Results

The study seeks to verify the economic viability of the project. Therefore, differences in investment payback periods have been obtained according to the variability of input parameters.

Figure 4 shows the payback period according to a possible increase or decrease in the price of electricity. It is observed that at current energy prices, the investment in a heat recovery system for a high-temperature application has a payback time on average of approximately 4 years.

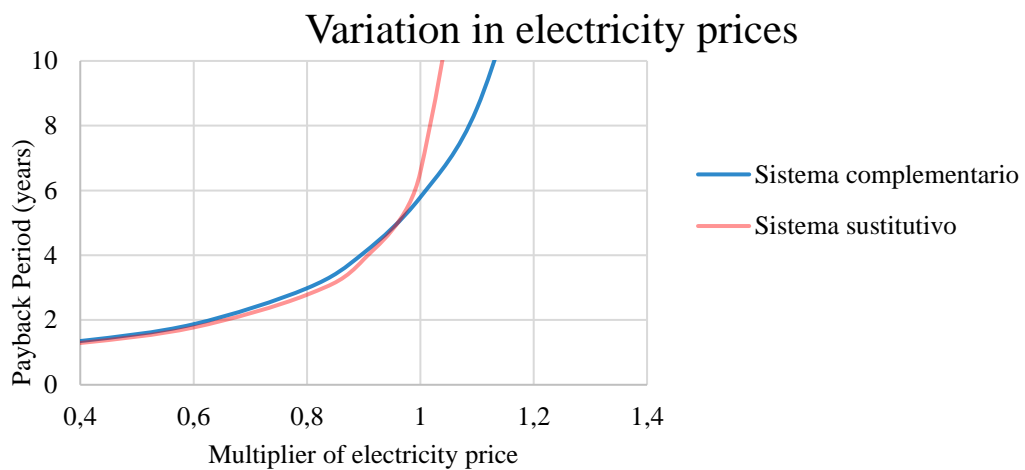


Figure 4: Profitability of the installation linked to electricity prices – Configuration 2.

#### 5. Conclusions

The project demonstrates the economic viability of the heat recovery systems presented. These results are particularly important in the cryptocurrency mining

industry, as the heat discarded in mining processes could be monetized and put to use, thus increasing the economic return on investment.

## **6. References**

- [1] Vries, A. (n.d.). *ScienceDirect*. Retrieved 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121000830>



# Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	1
Índice de figuras .....	3
Índice de tablas .....	5
Índice de ecuaciones .....	7
Introducción.....	9
Estado de la cuestión .....	11
Introducción a la minería .....	11
Refrigeración de las estaciones.....	13
Estado del arte.....	14
Motivación.....	17
Objetivos del proyecto.....	19
Objetivos de Desarrollos Sostenible (ODS) .....	21
Metodología de trabajo.....	23
Recursos a emplear.....	23
<b>Capítulo 1: Reutilización del calor disipado .....</b>	<b>25</b>
Refrigeración del ASIC .....	25
Refrigeración por aire .....	25
Refrigeración por inmersión líquida .....	26
Inmersión líquida en dos fases .....	27
Inmersión líquida en una fase.....	27
Elección del tipo de refrigeración .....	27
Cálculo del calor disipado .....	28
Analítico.....	28
Propiedades a considerar .....	28
Ecuaciones para intercambiadores de calor .....	28
Ecuaciones convección ASIC-Fluido.....	29
Computacional Fluid Dynamics (CFD) / ANSYS Fluent.....	33
Caso práctico.....	34
MATLAB .....	35
Cálculos.....	35
CFD .....	36
Configuración de la simulación.....	37
Resultados .....	37

Conclusiones .....	40
<b>Capítulo 2: Casos de uso .....</b>	<b>41</b>
Aplicaciones con temperatura menor a la PCB .....	42
Aplicaciones.....	42
Circuito e instalación .....	42
Caso práctico.....	43
Aplicaciones con temperatura mayor a la PCB .....	46
Aplicaciones.....	46
Circuito e instalación .....	47
Caso práctico.....	49
Conclusiones.....	50
<b>Capítulo 3: Viabilidad económica .....</b>	<b>51</b>
Viabilidad económica sistema 1 .....	52
Precio inversión inicial .....	52
Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).....	52
Viabilidad económica sistema 2 .....	54
Precio inversión inicial .....	54
Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI).....	54
Conclusiones y trabajos futuros.....	57
Referencias .....	59
Anexo I: Código fuente MATLAB .....	61



## Índice de figuras

Ilustración 1: Consumo de energía en el minado de BTC en relación con su precio.....	9
Ilustración 2: Diagrama de hardware estación de minado.....	11
Ilustración 3: Rig de minado de 12 GPU's.....	12
Ilustración 4: Interior bitcoin ASIC.....	13
Ilustración 5: Estación Bitcoin con accesorios de reducción de ruido instalados. ....	15
Ilustración 6: Interior minero ASIC.....	29
Ilustración 7: Hashing board, chips y sumideros de calor.....	30
Ilustración 8: Calor disipado por una superficie aleteada.....	31
Ilustración 9: Parámetros geométricos aleta según tipo. ....	32
Ilustración 10: Líneas de flujo simulación ANSYS Fluent. ....	33
Ilustración 11 y 12: Minero Bitmain Antminer S9 y minero Jasminer X16-P.....	34
Ilustración 13: Diseño caja refrigeración horizontal. ....	36
Ilustración 14: Diseño caja refrigeración vertical.....	37
Ilustración 15: Diseño caja refrigeración para tres mineros.....	37
Ilustración 16: Configuración horizontal una entrada un minero - Temperatura.....	38
Ilustración 17: Configuración vertical un minero - Temperatura.....	38
Ilustración 18: Configuración horizontal una entrada un minero - Velocidad.....	39
Ilustración 19: Configuración horizontal tres entradas un minero - Velocidad. ....	39
Ilustración 20: Configuración horizontal tres entradas tres mineros - Velocidad.....	39
Ilustración 21: Configuración vertical una entrada tres mineros - Velocidad.....	39
Ilustración 22: Configuración horizontal tres entradas tres mineros - Temperatura. ....	40
Ilustración 23: Configuración vertical una entrada tres mineros - Temperatura.....	40
Ilustración 24: Circuito aplicación con bomba de calor.....	41
Ilustración 25: Esquema simplificado para aplicaciones con temperaturas menores a la PCB.....	43
Ilustración 26: Intercambiador de placas.....	44
Ilustración 27: Características técnicas bomba.....	44
Ilustración 28: Curva caudal altura bomba.....	45
Ilustración 29: Prototipo circuito completo recuperación de calor en aplicaciones de menor temperatura que placa PCB. ....	45
Ilustración 30: Circuito recuperación de calor en aplicaciones de temperatura mayor a PCB.....	47
Ilustración 31: Circuito de una bomba de calor.....	48

Ilustración 32: Función del COP respecto al salto de temperatura.....	49
Ilustración 33: Ciclo ideal diagrama p-h bomba de calor.....	49
Ilustración 34: Evolución precio Bitcoin el último año a agosto 2023. ....	51
Gráfica 35: Rentabilidad de la instalación según precio de la electricidad. ....	52
Gráfica 36: Rentabilidad de la instalación según precio del bitcoin. ....	53
Gráfica 37: Rentabilidad de la instalación según precio del combustible. ....	53
Gráfica 38: Rentabilidad de la instalación según precio de la electricidad – sistema 2. ....	55
Gráfica 39: Rentabilidad de la instalación según precio del bitcoin – sistema 2. ....	55
Gráfica 40: Rentabilidad de la instalación según precio del combustible – sistema 2... ..	55
Ilustración 41: Rentabilidad diaria de 94 bitmain Antminer S19 XP.....	56

## Índice de tablas

Tabla 1: Índices de ruido según estancia y horario. ....	26
Tabla 2: Propiedades fluido refrigerante BitCool BC-888. ....	34
Tabla 3: Cálculo iterativo en MATLAB para temperatura de salida de 50 °C. ....	35
Tabla 4: Cálculo iterativo en MATLAB para temperatura de salida de 65 °C. ....	35
Tabla 5: Cálculo iterativo en MATLAB para temperatura de salida de 65 °C con minero a 75 °C. ....	36
Tabla 6: Tabla comparativa de diferentes configuraciones del ASIC ....	38
Tabla 7: Ejemplos de aplicaciones de bombas de calor en China. ....	47
Tabla 8: Propiedades del agua como refrigerante puntos 1 y 3 de la bomba de calor. ..	49
Tabla 9: Propiedades del agua como refrigerante puntos 2 y 4 de la bomba de calor. ..	50
Tabla 10: Inversión inicial circuito refrigeración. ....	52
Tabla 11: Inversión inicial circuito refrigeración con bomba de calor. ....	54
Tabla 12: Inversión inicial circuito refrigeración con bomba de calor con mineros existentes. ....	54



## Índice de ecuaciones

Calor absorbido fluido frío en un intercambiador de calor (1).....	28
Calor cedido fluido caliente en un intercambiador de calor (2) .....	28
Calor disipado placa plana a temperatura superficial constante (3) .....	30
Longitud crítica placa plana, laminar a turbulento (4) .....	30
Nusselt medio por Churchill & Ozoe (5) .....	31
Reynolds límite (6).....	31
Número de Prandtl (7).....	31
Coeficiente de convección medio (8).....	31
Calor disipado placa plana aleteada (9).....	32
Calor disipado aletas de placa plana (10).....	32
Calor disipado por aleta convectiva (11).....	32
Calor disipado aleta ideal (12).....	32
Rendimiento aleta real (13) .....	33
Flujo másico condensador(14) .....	50
Trabajo compresor (15) .....	50
Trabajo evaporador (16).....	50



## Introducción

El presente proyecto tratará el diseño y la validación de un sistema de recirculación de calor, que absorberá las emisiones caloríficas de mineros de Bitcoin para reutilizarlas en cualquier aplicación doméstica o industrial donde se haga uso de calor. Se diseñará todo el sistema, así como la construcción de un prototipo que valide su funcionamiento.

Como parte del trabajo se realizará un caso de negocio que justifique la comercialización de estos equipos teniendo en cuenta la incertidumbre de precios del mercado (gas, Bitcoin, etc.).

Este proyecto surge de la necesidad de aumentar la eficiencia del proceso de minado de las criptomonedas, que, desde la aparición del bitcoin en 2009, no ha parado de evolucionar. Esta evolución va ligada proporcionalmente al precio de mercado de las criptomonedas, ya que a medida que aumenta el valor del activo más capital atrae. En el caso del Bitcoin, se puede observar en la Ilustración 1 como a medida que aumenta el precio del bitcoin, aumenta también proporcionalmente el consumo de energía. (Vries) El precio del Bitcoin se ha obtenido del mercado de valores en relación con el dólar, mientras que el consumo de energía para minar esta criptomoneda se obtiene del índice BECI (DIGICONOMIST, n.d.).

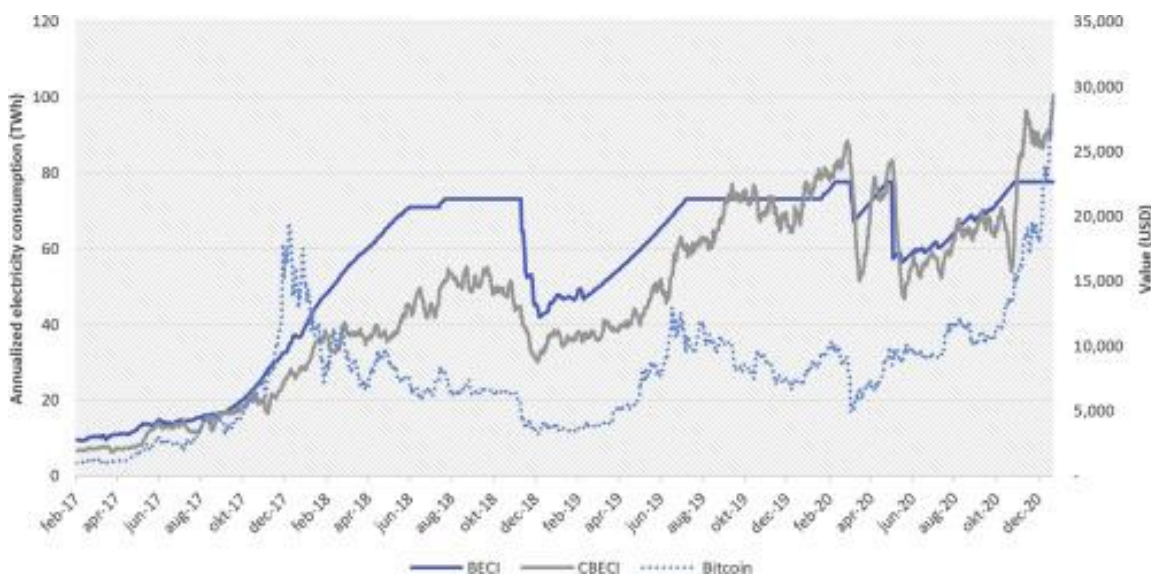


Ilustración 1: Consumo de energía en el minado de BTC en relación con su precio.

Esta relación de consumo energético viene dada por el aumento de interés en la criptomoneda a medida que aumenta su precio, ya que si durante el proceso de minado de un “bloque” de la blockchain se obtienen como recompensa actualmente 6.25 BTC, (Economía 3, s.f.) el proceso se vuelve más rentable económicamente cuanto más valor tenga respecto al dólar o euro.

Observando la Ilustración 1 se observa un consumo aproximado en 2020 de 80 Tera vatios hora [TWh] en el minado. Al ser un minado electrónico, los circuitos de minado tienen pérdidas caloríficas, que pretenden ser aprovechadas para uso doméstico o industrial.





# Estado de la cuestión

## Introducción a la minería

Cuando Satoshi Nakamoto creó el protocolo bitcoin, estaba pensado para ser minado en una unidad central de procesamiento (CPU) haciendo posible el minado, desde un ordenador de un particular, sin embargo, a medida que aumentaba el precio en los mercados de criptomonedas, surgían estaciones dedicadas exclusivamente a estos procesos.

Inicialmente, surgieron rigs the GPUs conectadas en conjunto dedicadas exclusivamente al minado. Estas estaciones estaban compuestas de elementos que se utilizan en un ordenador y que en cualquier momento podían volver a emplearse para tareas normales, sin embargo, a medida que aumentaba la competencia y el interés mundial por el bitcoin, empezaron a surgir circuitos integrados diseñados específicamente para realizar estas tareas de minado. Estas nuevas estaciones se denominan ASIC (Application Specific Integrated Circuit) y se han convertido en el proceso estándar para minar.

El inconveniente de estas nuevas estaciones se encuentra en la imposibilidad de realizar otras funciones, ya que el hardware de estas estaciones se ha diseñado para la resolución de un algoritmo específico de minado. En el caso de bitcoin el SHA-256 para Litecoinin script y así sucesivamente según la criptomoneda. Se ve por tanto el ASIC, obligado a minar permanentemente el mismo grupo de criptomonedas que utilicen el mismo tipo de algoritmo. (Investopedia, s.f.).

Para facilitar la comprensión, se mostrará primero en la Ilustración 2 e Ilustración 3 el diagrama de conexión de los diferentes componentes en una antigua estación de minado de GPUs y la apariencia básica común de estas estaciones.

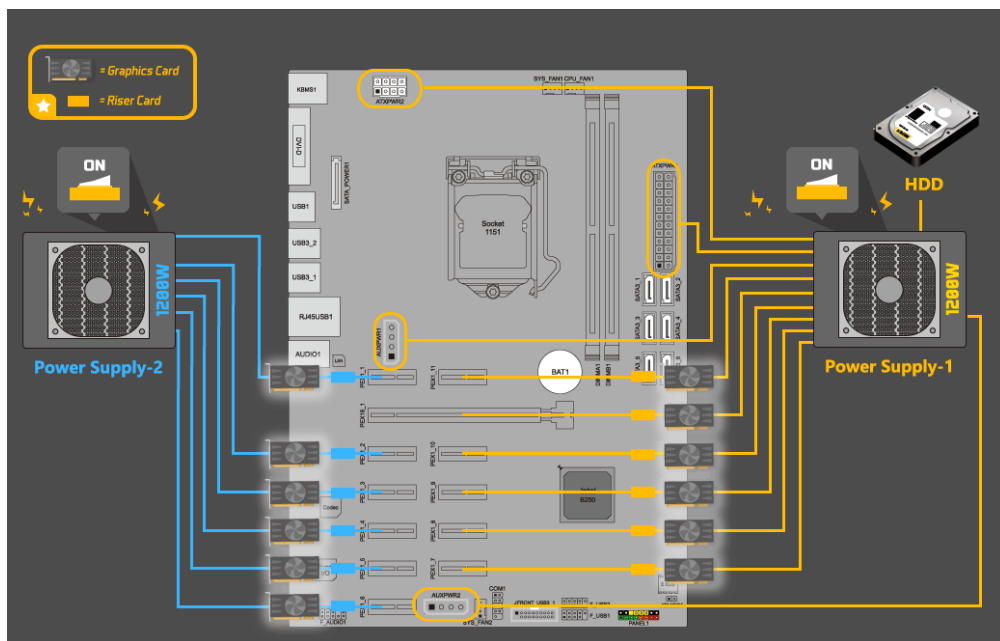


Ilustración 2: Diagrama de hardware estación de minado.

Principalmente, el sistema cuenta con una placa madre donde se encuentra la CPU que supervisa y controla las diferentes GPU's conectadas a esta. Estas GPU's (en azul en la Ilustración 3) requieren normalmente de adaptadores para poder conectarlas todas a la misma placa madre, por problemas de espacio. A más tarjetas gráficas, más fuentes de energía se necesitarán para alimentarlas, consumiendo la tarjeta gráfica media en torno a 200 vatios. Por último, se requieren de otros elementos como tarjetas de memoria, interruptores y adaptadores, irrelevantes en temas de consumo y generación de calor.



*Ilustración 3: Rig de minado de 12 GPU's.*

Estas estaciones de GPUs se han quedado obsoletas en el minado de ciertas criptomonedas debido a las ASIC, sin embargo, la versatilidad de una tarjeta gráfica común para la realización de diferentes tareas, y la posibilidad de la estación de cambiar la criptomoneda a minar les da una ventaja funcional frente a las ASIC.

Por otro lado, las ASIC, disponen de una PCB, hashing boards, sumideros de calor y ventiladores. Como se puede observar, son bastante simples en cuanto a componentes, pero estos son tremendamente especializados. En la Ilustración 4, se muestra el interior de un ASIC.



*Ilustración 4: Interior bitcoin ASIC*

Como se ha comentado anteriormente, la competencia en el minado es mayor según aumenta el precio de la criptomoneda, por ello, estas estaciones se han ido volviendo cada vez más potentes y complejas. Al aumentar la potencia de las estaciones, se vuelve necesario, la implantación de un sistema de refrigeración de los componentes, ya que estos se diseñan para trabajar eficientemente en un rango de temperaturas.

### Refrigeración de las estaciones

Toda instalación de minado de criptomonedas debe tener en cuenta el calor producido en su operación y evacuarlo del sistema. Normalmente la refrigeración se realiza por ventiladores, que introducen aire del ambiente donde se encuentre la estación en el sistema, manteniendo los componentes a una temperatura ideal de trabajo entre 65 y 85 grados Celsius.

El calor producido en estas estaciones es crítico y el colocar dicha estación en un ambiente de temperaturas bajas es clave en el ahorro energético para disipar dicho calor. Típicamente, este calor generado en la estación se desecha al ambiente, pero con las últimas subidas en el mercado de la energía, han ido surgiendo pequeños proyectos individuales de recuperación de calor. No obstante, no se ha realizado ninguna actividad empresarial relacionada con esta actividad directamente.

## Estado del arte

Han surgido hasta el momento, acciones comerciales ligadas a la disipación de este calor generado. Analizaremos a continuación el caso de la compañía DCX immersion (DCX Immersion, s.f.).

"The Liquid Cooling Company

Open direct liquid cooling solutions for it, telco, hpc, big data & blockchain infrastructures."

Esta compañía se describe a sí misma como una empresa de soluciones de refrigeración líquida directa para tecnologías como centros de datos, de telecomunicaciones o relacionados con el blockchain, el campo de interés de este estudio. La solución que presentan para la refrigeración líquida de las ASICs (Application Specific Integrated Circuit), son módulos individuales o racks con el circuito de refrigeración completamente integrado. Estas soluciones de refrigeración utilizan un circuito de líquido dieléctrico en contacto directo con las ASICs que deriva a intercambiadores de calor que expulsan el calor directamente al ambiente.

En su producto "Immersion Crypto Mining Rack" la compañía expone una capacidad de hasta 54 ASICs mineros, con una potencia de intercambiador de calor de 24 a 72 kW.

Este producto, presenta los requerimientos necesarios para la refrigeración directa de los mineros, sin embargo, no presenta una solución para aprovechar el calor desechado. Aun así, expone unas mejoras considerables a la minería doméstica a tener en cuenta. Reducción de ruido al no necesitar ventiladores individuales los mineros ASICs, racks más compactos y un ahorro considerable en la evacuación de calor. Por otro lado, estas instalaciones requieren una inversión inicial mayor en el equipo y una complejidad aumentada en el mantenimiento para el usuario.

Si se busca un proyecto que reutilice el calor generado por los mineros, Tri Nguyen, Anh Hoang realizó una tesis de ingeniería civil con el título de "*Reusing Waste Heat from Cryptocurrency Mining to Heat Multi-Family House*" (Tri Nguyen, 2018). En esta tesis, se presentan diferentes alternativas de reutilización del calor generado por un rack de minería. Entre ellos podemos diferenciar sistemas de un circuito único, siendo el propio fluido refrigerador el que transporta el calor y el reutilizado y de un sistema con dos circuitos diferenciados.

Como ejemplo del primero, se muestra un radiador móvil que genera calor con el propio procesador del ASICs. Estos sistemas presentan una solución de uso al calor generado para calentar una estancia, como un garaje o una habitación, sin embargo, no son capaces de solucionar el problema del ruido generado, hasta 75 dB (BIXBIT, s.f.). Han surgido soluciones comerciales para paliar el ruido de los ventiladores, instalando ventiladores y conductos de ventilación al interior de las ASICs reduciendo así el ruido. En la Ilustración 5 se muestra una estación de minería situada en un garaje con una instalación de accesorios para la reducción de ruidos. Se marca en rojo la estación original sin accesorios.



*Ilustración 5: Estación Bitcoin con accesorios de reducción de ruido instalados.*

Como se puede comprobar, la reducción de ruido supone una pérdida de espacio considerable, aumentando en más del doble el espacio necesario para una estación. Ante este problema, surgen las soluciones con dos circuitos diferentes.

Estos sistemas cuentan con un primer circuito por el cual circula el fluido refrigerador en contacto con el ASIC, llevando este calor hasta un segundo circuito con un segundo fluido que lo transportará hasta un lugar deseado. Como ejemplo, se muestra la instalación de un par de estaciones de minería, que se refrigeran mediante contacto directo con un líquido dieléctrico (primer fluido), el cual intercambia calor en un intercambiador con agua (segundo fluido). Esta agua se podrá almacenar para un uso posterior, para uso primario y consumo o para uso secundario, en sistemas de calefacción. Este segundo ciclo permite almacenar el calor en fluidos más fácilmente almacenables, transportables y hasta consumibles, siendo un claro ejemplo el agua. No es necesario que el primer circuito sea un líquido dieléctrico, pudiendo ser nuevamente el aire, sin embargo, la refrigeración por inmersión permite desactivar los ventiladores evitando ruidos molestos y obtener sistemas de refrigeración más compactos.



## Motivación

La motivación del proyecto viene dada por suplir una necesidad de aumentar la eficiencia de los procesos de minado. Debido a la necesidad de reducir consumos energéticos para reducir emisiones, a un aumento de la energía a año 2022 y a la volatilidad del mercado de las criptomonedas, se cree necesario la implantación de medidas de reutilización del calor generado por estos rig's de mineros.

Si se analiza desde el punto de vista energético un ASIC, se observa que la energía eléctrica que consume el ASIC se convierte en tres tipos predominantes de energía, térmica, mecánica y en menor medida lumínica. Diferenciando entre estas tres categorías, la energía calorífica generada se encuentra cerca del 100% del total de la energía consumida, ya que la energía mecánica es la consumida por los pequeños ventiladores de no más de 30 W de potencia y la energía lumínica es la generada por pequeños ledes que se pueden despreciar en la disipación de energía total. Asumiendo por tanto que la energía consumida por el ASIC se convierte exclusivamente en calor, siguiendo los datos proporcionados por la fuente (Vries) en la Ilustración 1 el calor disipado total es de 80 TWh, o 288 petajulios, una cantidad enorme de energía que en el mayor de los casos no solo se desecha, si no que se requiere de la utilización de sistemas adicionales de refrigeración y ventilación para poder disiparla correctamente.

Se observa por tanto un potencial alto para la creación de sistemas de recuperación de calor de estas unidades que pueda reaprovechar gran parte de este calor disipado al ambiente.





## Objetivos del proyecto

Se enumerarán a continuación los objetivos principales del proyecto.

- **Objetivos Principales**

El trabajo busca obtener la viabilidad técnico-económica de un sistema de recuperación de calor que aproveche el calor generado por una estación de minado de criptomonedas. Para ello se pretende conseguir la configuración más adecuada de intercambiador y fluido para el intercambio.

1. **Obtener el calor aprovechable generado por una unidad de minado.**

Se sabe de la generación de calor por partes de estas unidades, sin embargo, es necesario saber la cantidad de calor aproximada que pueda llegar a ser recuperable.

Estos coeficientes se estudiarán en función de los diferentes métodos de refrigeración de la unidad. Se estudiará la viabilidad de los fluidos a utilizar para dicha refrigeración y su modo de empleo.

2. **Elección fluido a utilizar**

Determinar el fluido final a emplear. Inicialmente se estudia la posibilidad de refrigeración por aire o la refrigeración por inmersión en un líquido dieléctrico a definir.

3. **Disposición de los equipos**

Una vez elegido el fluido se deberá estudiar la viabilidad y el modo de la instalación.

Estudiar la escalabilidad del proyecto. Se quiere estudiar la posibilidad de implementar esta generación tanto a nivel doméstico como a un nivel industrial, estudiando las necesidades que pudiera complementar o suplementar.

1. **Estudio mercado y viabilidad económica**

Habiendo alcanzado los anteriores objetivos, se estudiará las posibilidades del proyecto en el mercado, según precios de energía, precios de la instalación y valores de las criptomonedas.



## Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo (Naciones Unidas, s.f.). Se verán cuáles de estos objetivos se logran con este trabajo y se desarrollará como se pretende conseguir.

El objetivo número 7 dice lo siguiente: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. Aumentar la eficiencia en el consumo de energía no solo es beneficioso para el medio ambiente, sino que también supone una mejora en la viabilidad económica a largo plazo. Suponiendo que la estación de minado es existente, aprovechar el calor generado por esta, que en otro caso se desperdiciaría, supone un ahorro en el consumo de calor, que se necesitaría en un proceso tradicional.

En el caso en el que el equipo de minado no este instalado previamente, sería como objetivo ideal poder sustituir un equipo de generación de calor por una estación de minado de criptomonedas.

Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. La posibilidad de convertir casas y comunidades autónomas energéticamente genera ciudades con una mayor seguridad energética. La posibilidad de poder generar con una misma instalación un beneficio económico a la par que agua caliente sanitaria, abre las puertas a casas energéticamente más independientes. Promover estas actividades económicas, cuya única necesidad es una fuente de electricidad y una conexión a internet, puede promover en el caso de España la vuelta de algunas personas al mundo rural, lidiando con el problema español de la España rural vacía.



## Metodología de trabajo

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se usarán métodos teóricos de cálculo de transmisión de calor (Çengel & Ghajar, 2004), mecánica de fluidos y análisis económicos. Estos cálculos se ayudarán de métodos de CFD (Computational Fluid Dynamics) tanto como para la transmisión de calor como para la mecánica de fluidos.

Para el estudio de la competitividad de la instalación en el mercado, se estudiarán los valores de la energía a nivel global y los valores de las diferentes criptomonedas en el mercado para la viabilidad económica de la instalación.

## Recursos a emplear

Se utilizarán métodos de cálculo convencionales para la dimensión inicial del circuito, donde se utilizarán ecuaciones de transmisión de calor y de mecánica de fluidos. Como herramienta, se utilizará un código de Matlab, y se estudiará la viabilidad de la implementación de un modelo en ANSYS para el estudio del flujo global y la transmisión de calor.

Realizados estos cálculos, se estudiará la viabilidad del prototipo en el laboratorio de ICAI.



# Capítulo 1: Reutilización del calor disipado

En los siguientes apartados, se verán los conceptos y procesos que se utilizarán en la realización del proyecto. Se nombrarán los métodos analíticos y computacionales utilizados, haciendo una breve descripción de cada uno de ellos. Se compararán los resultados y se elegirá la configuración ideal para según qué casos.

## Refrigeración del ASIC

El ejercicio principal del proyecto busca aprovechar el calor generado por los ASIC, para poder utilizarlo a conveniencia para otro proceso elegido. Tanto como si se quiere utilizar el calor extraído para uso doméstico como para un uso industrial, el primer objetivo es obtener el calor generado por el ASIC de la manera más eficiente posible. Esto, se puede realizar de las siguientes maneras descritas a continuación.

### Refrigeración por aire

El primer método a plantear sería la implantación de un sistema que recircule el calor disipado por los ventiladores de fábrica de los ASIC y se reutilice de manera independiente en otro circuito. Si bien es la solución más sencilla a la hora de la instalación inicial, no necesitando ningún elemento adicional para refrigerar del ASIC, presenta las diferentes desventajas.

- Contaminación acústica.

Debido a la baja convectividad del aire, los ventiladores integrados de fábrica necesitan generar caudales de aire muy grandes para la refrigeración, llegando hasta las 7500 revoluciones por minuto. Dichos ventiladores generan un ruido constante medio de 70 dB.

Si comprobamos la normativa española, observamos como los niveles de ruido que se admitirían en zonas colindantes a una instalación, se encuentran entre los 25 y 40 dB, según Tabla 1, superando la normativa española.

Por tanto, se deberá prever un aislamiento a dicha instalación ya sea en ubicaciones aisladas o en estancias debidamente aisladas que consigan alcanzar los índices de ruido en las estancias colindantes (noisess, s.f.).

Tabla 1: Índices de ruido según estancia y horario.

Uso del local colindante	Tipo de Recinto	Índices de ruido		
		$L_{K,d}$	$L_{K,e}$	$L_{K,n}$
Residencial	Zonas de estancias	40	40	30
	Dormitorios	35	35	25
Administrativo y de oficinas	Despachos profesionales	35	35	35
	Oficinas	40	40	40
Sanitario	Zonas de estancia	40	40	30
	Dormitorios	35	35	25
Educativo o cultural	Aulas	35	35	35
	Salas de lectura	30	30	30

- Menor eficiencia térmica

Esta desventaja viene dada por las características del fluido utilizado, aire. La capacidad calorífica del aire (1,12) es menor que la capacidad calorífica de los líquidos como el agua (4,18). Esto implica tener que mover mayores volúmenes de fluido, aumentando el espacio necesario para la instalación.

- Menor vida útil

Los ASIC, como todo elemento electrónico, se diseñan con una vida útil limitada. Debido a su reciente introducción al mercado, 2016, se desconoce la vida útil real de los equipos.

Los equipos refrigerados por aire están condicionados por la temperatura del su entorno. Variaciones muy rápidas en la temperatura del ambiente, puede provocar que los diferentes componentes del ASIC se dilaten o compriman a velocidades diferentes, provocando un desgaste general que puede derivar en un fallo mecánico (CRIPTONOTICIAS, s.f.).

Adicionalmente, el funcionamiento de estos ventiladores girando a altas velocidades provoca una vibración constante en el equipo, en el que pueden aparecer grietas a largo plazo. Por último, si el ambiente no está limpio el polvo impulsado por los ventiladores golpea constantemente las placas internas del dispositivo, pudiendo dañarlas si el efecto es constante en el tiempo.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de esta opción, se comparará con una refrigeración del ASIC por inmersión líquida.

## Refrigeración por inmersión líquida

Analizada la refrigeración por aire, se estudiará la viabilidad de la recuperación del calor generado, mediante refrigeración líquida del ASIC. Para los casos de refrigeración líquida de componentes electrónicos, existen muchos precedentes en la industria y aplicaciones



para el hogar. Se verán a continuación las opciones más comunes para este tipo de refrigeración.

#### Inmersión líquida en dos fases

Este tipo de tecnología utiliza líquidos diseñados para evaporarse absorbiendo así el calor de los componentes electrónicos. Dicho fluido, ahora en forma de gas se dirige a un condensador donde el fluido vuelve a estado líquido y comienza el circuito nuevamente. El cambio de fase en estos sistemas supone una complejidad adicional en los equipos a usar para la refrigeración y complica la instalación y mantenimiento.

#### Inmersión líquida en una fase

Este tipo de refrigeración es similar a la anterior, a excepción de que el líquido a usar en contacto con la fuente de calor no cambia de fase, si no que se mantiene en estado líquido permanentemente. Esto, supone una instalación menos complicada en comparación con la refrigeración multifase.

La principal desventaja que presenta la refrigeración por inmersión líquida es la instalación inicial que se requiere. Se ha de tener en cuenta con la preparación inicial de los ASIC, el líquido refrigerante a utilizar y la consecuente red hidráulica para manejar dicho fluido con sus diferentes elementos como bombas, tuberías, tanques y válvulas.

### Elección del tipo de refrigeración

Analizando todos los factores, se ha considerado que la mejor opción de refrigeración es la refrigeración líquida por inmersión. Se ha escogido esta opción debido a la compatibilidad, escalabilidad y eficiencia que ofrece un diseño por inmersión.

Es un diseño compacto debido a una mayor capacidad calorífica de los líquidos de refrigeración frente al aire, más fácilmente escalable gracias a la compatibilidad del diseño y una mayor eficiencia debido a que el calor se quiere transportar para ser usado en otra aplicación, queriéndose evitar las mayores pérdidas posibles durante el transporte.

Eligiendo el tipo de inmersión se ha escogido la inmersión en una sola fase por su instalación más sencilla y una mayor amplitud de líquidos de refrigeración de este tipo en el mercado.

Visto el tipo de refrigeración escogido, se podrá calcular de forma analítica y vía computacional (CFD) el calor extraído de un ASIC.

# Cálculo del calor disipado

## Analítico

El cálculo analítico permite hacer una muy buena aproximación a la realidad de la cantidad de calor que es capaz de absorber el refrigerante y trasladar a otro fluido. Se expone a continuación los métodos utilizados.

### Propiedades a considerar

Actualmente en el mercado hay una alta variedad de productos refrigerantes líquidos diseñados para la refrigeración de circuitos electrónicos. Sin embargo, aunque puedan estar compuestos de compuestos diferentes, la experiencia muestra que la transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades viscosidad dinámica  $\mu$ , conductividad térmica  $k$ , densidad  $\rho$  y calor específico  $c_p$  del fluido, así como de la velocidad del fluido. También depende de la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida, además del tipo de flujo del fluido (el que sea laminar o turbulento). Por tanto, se espera que las relaciones de la transferencia de calor por convección sean un tanto complejas debido a su dependencia de tantas variables. Esto no es sorprendente, ya que la convección es el mecanismo más complejo de transferencia de calor. (Yungus)

Estas propiedades intervienen en la convección entre líquido y ASIC y en intercambiadores de calor. Se verán a continuación las formas de aplicar las propiedades mencionadas en estas dos formas de transferencia de calor

### Ecuaciones para intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden considerar como aparatos de flujo estacionario, debido a que operan durante largo tiempo en las mismas condiciones. Asimismo, se considera despreciable la mínima o a veces nula variación de energía cinética y potencial que ocurre en las corrientes de fluido. El calor específico de un fluido cambia con la temperatura; pero, en un intervalo específico de temperaturas, se puede considerar como una constante en algún valor promedio, con poca pérdida en la exactitud. La conducción axial de calor a lo largo del tubo suele ser insignificante y se puede considerar despreciable. Por último, se supone que la superficie exterior del intercambiador de calor está perfectamente aislada, de modo que no se tiene pérdida de calor hacia el medio circundante y cualquier transferencia de calor sólo ocurre entre los dos fluidos.

Las suposiciones expuestas, se acercan mucho a la realidad y simplifican el análisis de un intercambiador sin sacrificar exactitud. Por ello con estas suposiciones, se puede aplicar la *primera ley de la termodinámica*, que indica que la transferencia de calor desde el fluido frío (1), es la misma a la transferida por el fluido caliente (2)

$$\dot{Q} = \dot{m}_f C_{p,f} (\dot{T}_{f,sal} - T_{f,ent}) \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{p,c} (\dot{T}_{f,ent} - T_{f,sal}) \quad (2)$$

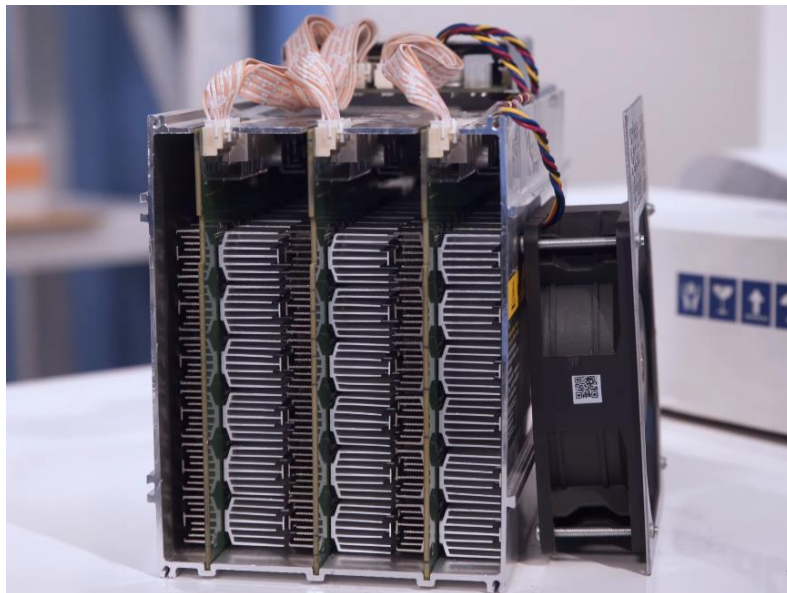
Donde los subíndices  $f$  y  $c$  se refieren a los fluidos *frío* y *caliente*, respectivamente y

$$\dot{m}_f, \dot{m}_c = \text{Gastos de masa}$$
$$C_{p,f}, C_{p,c} = \text{Calores específicos}$$
$$T_{f,ent}, T_{c,ent} = \text{Temperaturas de entrada}$$
$$T_{f,sal}, T_{c,sal} = \text{Temperaturas de salida}$$

#### Ecuaciones convección ASIC-Fluido

Para entender y comprender como disipa calor por convección el ASIC, es importante ver las características geométricas de sus componentes que requieran de esta disipación de calor. Aunque existen muchos tipos de ASIC en el mercado de diferentes marcas, todos tienden a tener la misma configuración de componentes internos.

Estos dispositivos cuentan con una PCB, hashing boards, sumideros de calor y ventiladores. En la Ilustración 6 se muestra el interior de un ASIC. Los elementos más importantes en cuanto a disipación son la hashing boards, realizando todo el trabajo de minado estas placas. Se pueden considerar placas prácticamente planas de tamaño variable en función de las características del modelo. Estas planas serán más grandes y contendrán más chips a medida que aumente la potencia de minado.



*Ilustración 6: Interior minero ASIC*

Como la placa plana no puede disipar todo el calor generado, se ubican encima de cada chip (encargado del cálculo) sumideros de calor en forma de aletas, que aumentan el área de contacto con el fluido refrigerante, aumentando así la disipación de calor por convección. Se muestra la configuración en la Ilustración 7.



Ilustración 7: Hashing board, chips y sumideros de calor.

La potencia calorífica total intercambiada por una superficie plana de temperatura superficial constante, se puede calcular con la ecuación (3).

$$q = \bar{h} A(T_S - T_\infty), \quad T_S = cte \quad (3)$$

Primero se calcula la longitud crítica de la placa para determinar el tipo de fluido (laminar, turbulento o mixto) alrededor de la placa. Se toma el Reynolds crítico, fijado entre  $5 \cdot 10^5$  y  $6 \cdot 10^6$  según la mayoría de los autores. Para asegurarse, en este proyecto se utilizará el Reynolds más restrictivo de  $5 \cdot 10^5$ .

$$X_{critica} = \frac{Re_{critico} \nu}{u_\infty} \quad (4)$$

Siendo;

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido

$u_\infty$  = Velocidad del medio fluido

Como el resultado de la  $X_{critica}$  es mayor a la longitud de la placa, se asume un fluido en estado laminar en toda la longitud de la placa. Teniendo esto en cuenta, se procede a calcular el coeficiente de convección medio mediante las ecuaciones de Nusselt por Churchill & Ozoe.

$$\overline{Nu}_L = \frac{0,3387 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \quad (5)$$

Siendo el Reynolds límite (6) y el número de Prandtl (7). Este último, da una medida relativa de los espesores de las capas límite hidrodinámica y térmica.

$$Re_{Limite} = \frac{u_\infty L}{\nu} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}; \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (7)$$

Por último, se calcula el coeficiente de convección medio como;

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} \quad (8)$$

En el caso de tratarse de una placa plana se podría obtener ya directamente el calor disipado, sin embargo, como se trata de una superficie aleteada, se ha tener en cuenta el calor disipado por estas. En la ilustración 8 se muestran los caminos que puede tomar el calor para disiparse en una superficie de estas características. Ilustración 8: Calor disipado por una superficie aleteada.

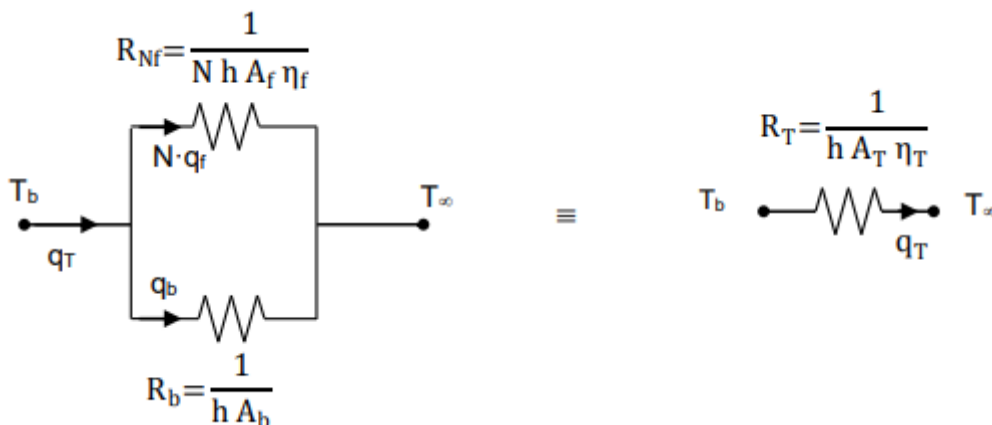


Ilustración 8: Calor disipado por una superficie aleteada.

Se aprecia en la Ilustración 8, como el calor disipado total se descompone en el calor disipado por la base ( $q_b$ ) y el calor disipado total por las aletas ( $N \cdot q_f$ ). Donde:

$$q_b = \bar{h} A_b (T_b - T_\infty), \quad T_b = cte \quad (9)$$

$$q_f = N \bar{h} A_f \eta_f (T_b - T_\infty) \quad (10)$$

Siendo;

$A_b, A_f$  = Área de la base libre, Área una aleta

$N$  = Número de aletas

$\eta_f$  = Rendimiento aleta respecto aleta ideal

Para calcular el rendimiento de cada aleta, es necesario calcular el calor disipado por una aleta real de nuestro modelo con respecto a una ideal del mismo. Para su cálculo se han usado las siguientes fórmulas, asumiendo la aleta de nuestro modelo como convectiva;

$$q_f = M \frac{\sinh(mL) + \frac{h}{mk} \cosh(mL)}{\cosh(mL) + \frac{h}{mk} \sinh(mL)} \quad (11)$$

$$q_{fideal} = \bar{h} A_f (T_b - T_\infty) \quad (12)$$

Donde;

$$m = \sqrt{\frac{hp}{kA_k}} \quad y \quad M = (T_b - T_\infty) \sqrt{hp k A_k}$$

$L$  = Longitud aleta

$h$  = coeficiente de convección medio

$k$  = conducción del material de la aleta

Donde  $p$  y  $A_k$  son parámetros dimensionales que dependen de la geometría de la aleta como se observa en la Ilustración 9.

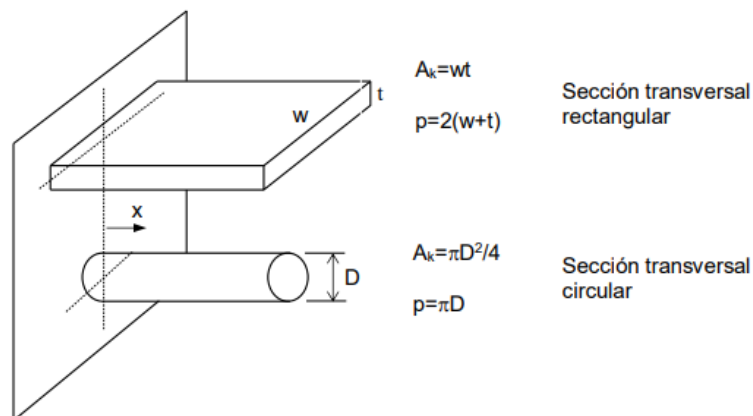


Ilustración 9: Parámetros geométricos aleta según tipo.

Siendo el rendimiento, por tanto;

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{fideal}} \quad (13)$$

Siguiendo este proceso de cálculo, se ha querido calcular la velocidad óptima del refrigerante, ya que interesa obtener el mayor salto térmico posible en el fluido sin llegar a dañar el dispositivo. La temperatura de trabajo óptima de diseño de las *hashing boards* se encuentra entre 65 y 95 grados Celsius según modelo. (bitmain, 2022)

### Computacional Fluid Dynamics (CFD) / ANSYS Fluent

Para realizar el cálculo del calor disipado, se tiene también a disposición el software ANSYS Fluent (Ansys, 2023). Es el software líder de la industria en simulación de fluidos conocido por sus capacidades de modelaje y su precisión en la industria.

Para su utilización, se ha de realizar un modelo fluido a simular e introducir sus condiciones de contorno. Introducidas las condiciones de contorno, el software soluciona automáticamente mediante métodos numéricos el caso, obteniéndose como resultado, las condiciones del fluido en cualquier punto del espacio de este.

Por tanto, el software servirá si se tiene una idea previa del comportamiento del fluido. Por ello una solución con el método analítico complementada con la simulación, preverá con muy poco margen de error la realidad. En la Ilustración 10 se observa como el software simula la entrada de un fluido refrigerante a través de los componentes de un ASIC y como se va calentando. Se refleja la temperatura del fluido en el color de las líneas. Imágenes de este tipo no muestran resultados exactos, pero sí generan una idea cualitativa del comportamiento del fluido. En el caso de querer obtener datos número sobre cualquier parámetro, se podrá obtener en los resultados de la simulación.

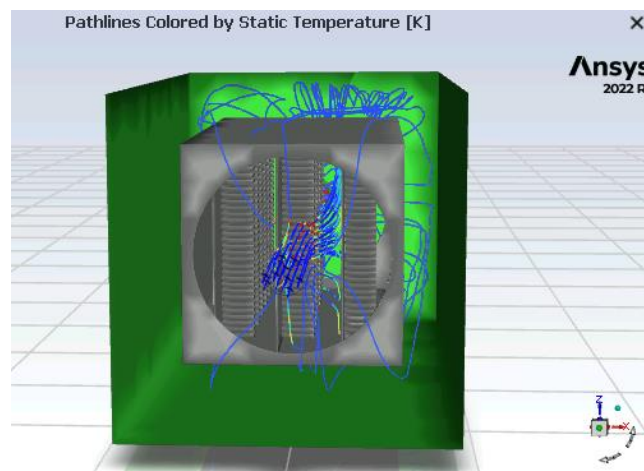


Ilustración 10: Líneas de flujo simulación ANSYS Fluent.



## Caso práctico

Como el diseño y configuración principal geométrica entre los mineros es muy similar, se ha escogido uno de los mineros más populares y asequibles del mercado, el modelo ANTMINER S9, Ilustración 11. Las diferencias principales entre los diferentes mineros se encuentran en el número de bloques, calidad del chip, algoritmo de minado y materiales de construcción. En la Ilustración 11 y 12: Minero Bitmain Antminer S9 y minero Jasminer X16-P se puede comprobar como el bloque básico es el mismo que en el minero S9 con la diferencia de la introducción de un segundo y tercer bloque. Como se puede comprobar en el nombre, los mineros son fabricados por compañías totalmente diferentes, dándose este caso en la inmensa mayoría del sector.

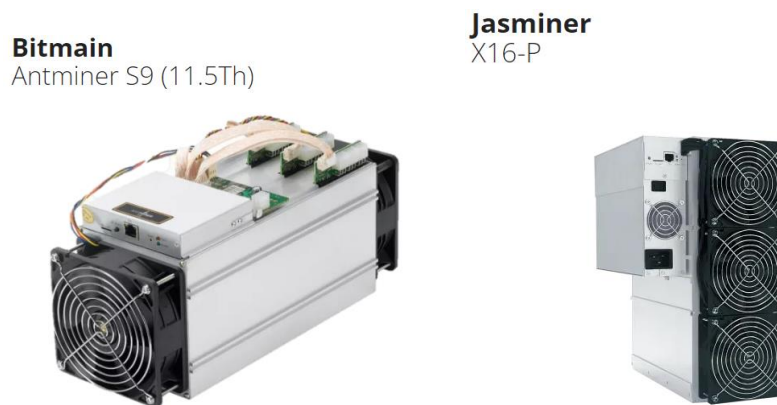


Ilustración 11 y 12: Minero Bitmain Antminer S9 y minero Jasminer X16-P.

En la elección del fluido, se ha optado por una de las marcas más populares del sector, ENGINEERED FLUIDS (ENGINEERED FLUIDS, 203). Esta compañía se especializa en la creación de fluidos dieléctricos para su uso en aplicaciones de minado. El fluido elegido es el BitCool BC-888. En la Tabla 2 se muestran las características del fluido aportadas por el fabricante.

Tabla 2: Propiedades fluido refrigerante BitCool BC-888.

Specification	BitCool BC-888
Application	Single-phase, Liquid Immersion Cooling for ASIC-based currency mining
Appearance	Clear with Light Green Tint
Pour Point (C)	<-60
Flash Point (C)	>180
Density, g/cc @ 15.6°C	0.82
Coefficient of Thermal Expansion, (volume/°C)	0.00067
Operational Temperature Range (C)	5.0 100.0
Kinematic Viscosity (cSt) 40C	8.3
100C	2.6
Thermal Conductivity (W/m²K) 40C	0.1396
100C	0.1373
Specific Heat (kJ/kg°C) 40C	2.0540
100C	2.2032



## MATLAB

Para facilitar el cálculo analítico y poder realizar iteraciones, se han introducido las ecuaciones comentadas en el apartado “Analítico” en el software de MATLAB.

Todo el código completo se muestra en el apartado de anexos (: Código fuente MATLAB).

Como se ha comentado previamente, el objetivo de este cálculo será obtener la velocidad del fluido mínima, que pueda disipar la totalidad del calor producido por el ASIC. En el caso del minero elegido (S9), se supone para el cálculo, que la totalidad de la potencia eléctrica consumida se convierte en calor, este minero generará 1300 vatios de calor que el refrigerante debe ser capaz de absorber si se quiere mantener estable la temperatura. Si el refrigerante no disipa el calor establecido, la temperatura aumentaría, por el contrario, si el refrigerante absorbe más energía de la producida la temperatura del ASIC disminuiría. En ambos casos, el escenario es desfavorable. Si la temperatura aumenta en exceso, los componentes del minero podrían dañarse y si la temperatura disminuye, la temperatura del refrigerante a la salida del minero será menor.

### Cálculos

Introducidos todos los parámetros y datos geométricos en MATLAB, se realiza la primera iteración estableciendo una velocidad inicial de 0,01 [m/s], a una temperatura media de fluido de 50 grados Celsius y una temperatura de PCB de 70 °C. A medida que se requiera una temperatura de salida de fluido mayor, se requerirá de una velocidad también mayor, ya que el salto térmico entre fluido y minero será cada vez menor. Se comprueba dicho aumento de la velocidad comparando la Tabla 3 y

Tabla 4.

Tabla 3: Cálculo iterativo en MATLAB para temperatura de salida de 50 °C.

	<b>Iteración 1</b>	<b>Iteración 2</b>	<b>Iteración 3</b>	<b>Iteración n</b>
<b>Velocidad [m/s]</b>	0,01	0,015	0,0125	0,01157
<b>Calor disipado [W]</b>	1210	1476	1350	1300

Tabla 4: Cálculo iterativo en MATLAB para temperatura de salida de 65 °C.

	<b>Iteración 1</b>	<b>Iteración 2</b>	<b>Iteración 3</b>	<b>Iteración n</b>
<b>Velocidad [m/s]</b>	0,01	0,2	0,22	0,2028
<b>Calor disipado [W]</b>	308	1291	1349	1300

Como se puede comprobar la velocidad requerida es de un orden superior. Si se quisiera optar por esta temperatura, la solución más simple ante un aumento de velocidad peligroso, pudiéndose dañar el minero, es operar el minero a una temperatura superior.

Se muestra la velocidad necesaria de fluido para una temperatura de PCB de 75 grados Celsius en la Tabla 5.

Tabla 5: Cálculo iterativo en MATLAB para temperatura de salida de 65 °C con minero a 75 °C.

	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración n
<b>Velocidad [m/s]</b>	0,2028	0,1	0,05	0,0458
<b>Calor disipado [W]</b>	2617	1884	1356	1300

A continuación, se quiere encontrar la configuración geométrica más óptima de la caja que va a contener al minero. Se modelarán y se realizarán varias simulaciones comparando el comportamiento térmico del fluido en cada caso.

### CFD

Se han diseñado dos diferentes configuraciones de contorno con dos diferentes tipos de entrada de fluido. La primera configuración coloca el equipo de manera horizontal,

Ilustración 13, mientras que la segunda configuración, Ilustración 14, el minero se ubicará de manera vertical.

Existen varias diferencias entre las dos configuraciones, la primera busca facilitar el flujo del fluido, haciendo que este sea lo más paralelo posible a las placas base del ASIC. En la segunda configuración, se ha colocado el ASIC de manera vertical, buscando que el flujo discorra en el mismo sentido que la convección natural.

Adicionalmente, para cada configuración, se realizará conjuntamente un estudio de escalabilidad, comparando cómo se comporta cada configuración refrigerando 3 mineros simultáneamente (Ilustración 15).

En las simulaciones, se comparará y se observará el comportamiento de cada configuración, contemplado que configuración es la ideal y ventajas y desventajas de cada una de ellas.

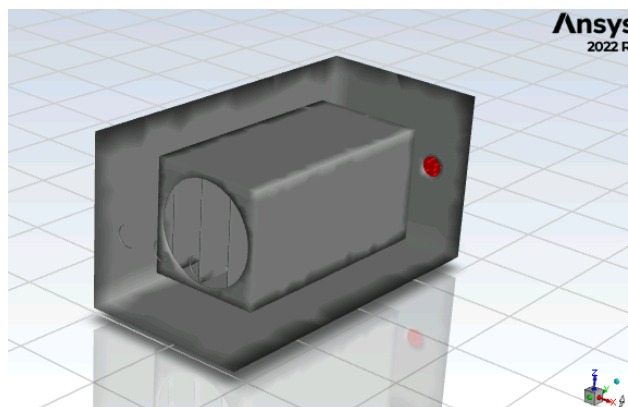
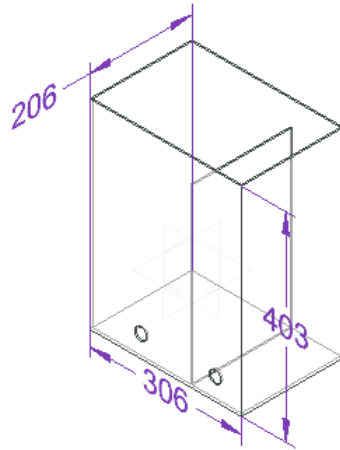
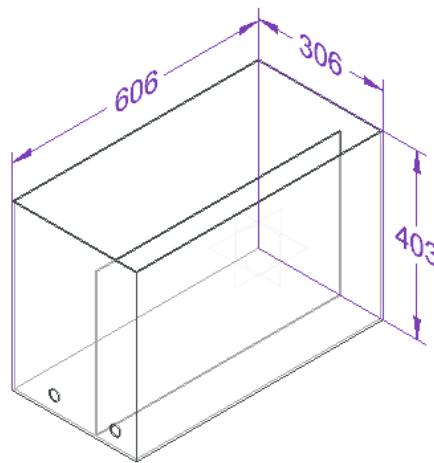


Ilustración 13: Diseño caja refrigeración horizontal.



*Ilustración 14: Diseño caja refrigeración vertical.*



*Ilustración 15: Diseño caja refrigeración para tres mineros.*

El caudal en todas las simulaciones será el mismo, la temperatura de las placas base del minero será la misma y la caja será totalmente adiabática en todos los casos.

#### Configuración de la simulación

Siguiendo con los resultados de la Tabla 1, se establece una velocidad optima teórica de 0,0115 metros por segundo en la caja, diferente a la velocidad de entrada por la tubería del fluido, que se indica en cada caso en la Tabla 6, con una temperatura de entrada de 323 grados kelvin, 50 °C.

Para las placas base y las aletas, se ha establecido una temperatura media de 343 grados kelvin o 70 °C. Esta temperatura se encuentra entre los límites normales de funcionamiento de estos dispositivos ASIC, pudiendo llegar estos hasta temperaturas de 115 °C según marca y modelo de dispositivo.

#### Resultados

En la Tabla 6, se comparará la temperatura del fluido a la salida de la caja, el salto térmico del fluido entre salida y entrada y el calor absorbido por el fluido entre las diferentes configuraciones de recipiente. La nomenclatura de las configuraciones, será la siguiente:

- Subíndice: Indica el número de entradas de fluido a la caja.
- Multiplicador: Hace referencia al número de mineros dentro de una caja.

Tabla 6: Tabla comparativa de diferentes configuraciones del ASIC

Disposición	Velocidad [m/s]	Temperatura salida [K]	Salto térmico [K]	Calor absorbido [W]
Horizontal <sub>1</sub>	0,8149	323,7	2,7	1899,1
Horizontal <sub>3</sub>	0,2716	323,74	2,74	1934,1
Horizontal <sub>3</sub> x3	0,2716	325,69	4,69	3283,0
Vertical <sub>1</sub>	0,8149	323,7	2,7	1771,9
Vertical <sub>1</sub> x3	0,8149	325,06	4,06	2654

Observando los resultados obtenidos y comparándolos, se pueden llegar a las siguientes conclusiones.

1. Flujo paralelo a las PCB mejor que convección natural:

Las configuraciones horizontales son capaces de evacuar más calor que las configuraciones verticales, a pesar de no ir el flujo en la misma dirección que la convección natural.

Se podría estudiar la configuración vertical introduciendo el flujo por debajo de la caja, coincidiendo así el sentido también con la convección natural. Sin embargo, esta configuración supondría una complicación en el diseño, y sería inviable desde el punto de vista de la escalabilidad.

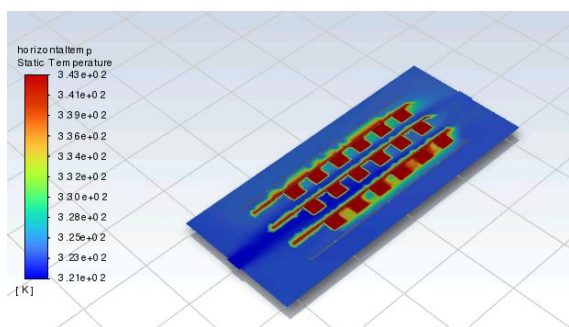


Ilustración 16: Configuración horizontal una entrada un minero - Temperatura.

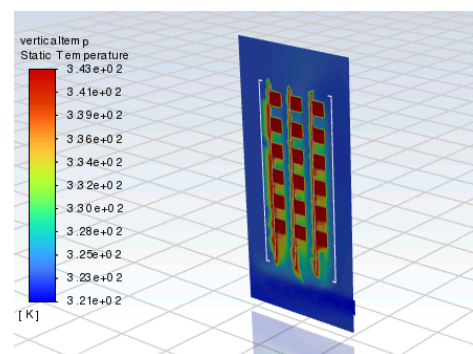


Ilustración 17: Configuración vertical un minero - Temperatura.

2. Entrada del fluido por una o más de una tubería:

Si comparamos las dos primeras configuraciones, observamos con una configuración con más de una entrada de fluido, favorece mínimamente la disipación de calor. Sin embargo, habrá que tener en cuenta si dicho aumento en la disipación compensa el aumento en la complejidad de la instalación.

Como se puede observar en las Ilustración 18 y Ilustración 19, la entrada del fluido por tres entradas diferentes provoca una homogenización mayor de la velocidad del fluido, provocando una disipación más uniforme en todos los elementos del dispositivo.

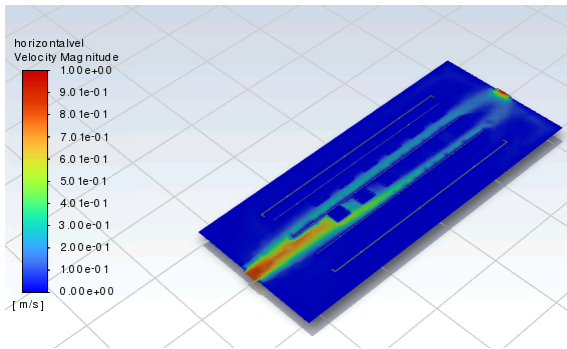


Ilustración 18: Configuración horizontal una entrada un minero - Velocidad.

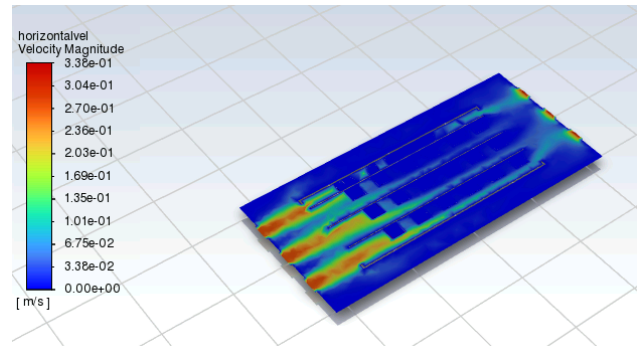


Ilustración 19: Configuración horizontal tres entradas un minero - Velocidad.

### 3. Diferencias en los modelos al escalar el proyecto:

Comparandose las diferencias entre los modelos de tres mineros, se comprueba una diferencia considerable entre el modelo vertical y horizontal en el calor disipado (Tabla 6). Se confirma de nuevo, como la configuración horizontal favorece la disipación de calor.

Por otro lado, la configuración vertical permite un diseño más compacto, con menor huella en planta, que, en el caso de tener restricciones de espacio en la instalación, sería la opción a escoger. En las imágenes de la Ilustración 20 a la Ilustración 23, se puede observar las distribuciones de temperatura y velocidad de las diferentes configuraciones.

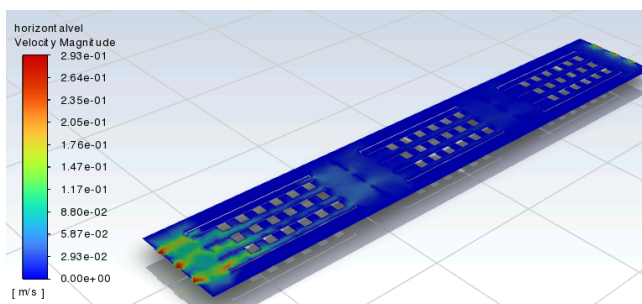


Ilustración 20: Configuración horizontal tres entradas tres mineros - Velocidad.

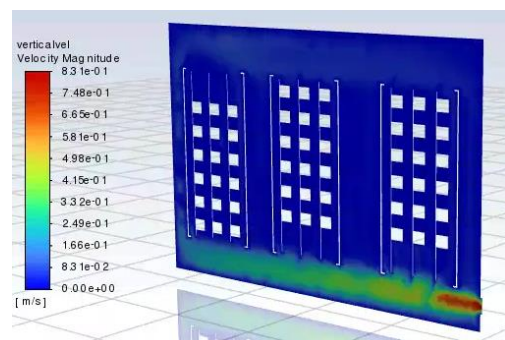


Ilustración 21: Configuración vertical una entrada tres mineros - Velocidad.

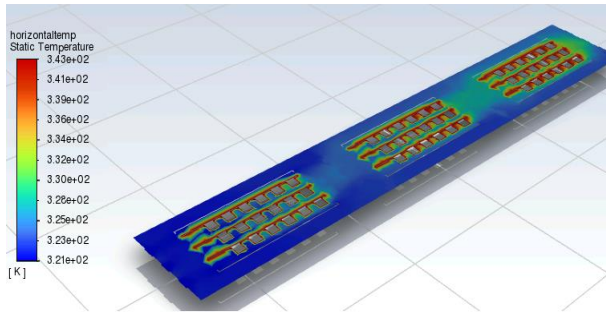


Ilustración 22: Configuración horizontal tres entradas tres mineros - Temperatura.

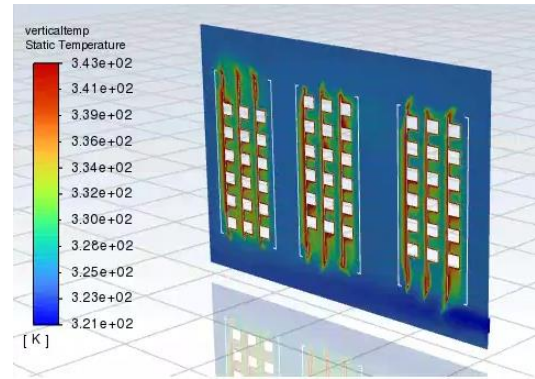


Ilustración 23: Configuración vertical una entrada tres mineros - Temperatura.

#### 4. Eficiencia en la escalabilidad:

Comprobándose los datos obtenidos en la Tabla 6, se observa como el calor obtenido en una configuración de tres mineros no es tres veces mayor al obtenido por un minero. Esto se debe a que a medida que el refrigerante se calienta, pierde capacidad para absorber calor, como se ha demostrado en las tablas Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5. Por ello, si se quiere encadenar mineros para obtener un salto de temperatura mayor, se ha de ir aumentando gradualmente la velocidad del fluido con el fin de poder aprovechar del minero el máximo calor posible.

Esto se podría conseguir diseñando una caja de geometría variable que reduzca su sección a medida que se necesite una velocidad de dispersión mayor o introduciendo cada minero en una secuencia de gradualmente menor sección de recipientes individuales. Dicho diseño se dejará para una posible continuación del presente proyecto.

#### Conclusiones

En la inmensa mayoría de las instalaciones donde hay equipos de minado, estos se encuentran en grandes cantidades, por tanto, las configuraciones a usar tendrán que tener en cuenta la introducción de más de un minero. Suponiendo que el espacio no es una restricción en la instalación, se propondrá el uso de una instalación en horizontal de los mineros. En el caso de existir restricciones de espacio, se utilizará la configuración vertical de los mineros.

## Capítulo 2: Casos de uso

Obtenido el calor disipado de los mineros y vista como se ha de diseñar la caja de refrigeración para optimizar el proceso, se requiere hacer a continuación un análisis de los posibles usos que se le puede dar a dicho calor, almacenado en el líquido refrigerante.

Como se ha comentado anteriormente, las instalaciones de mineros se dan en cantidades de más de un minero, por tanto, según el calor disipado disponible de toda la instalación se podrá destinar a un uso u otro. Sin embargo, el factor limitante del tipo de instalación a realizar será la temperatura máxima de la placa base, ya que esta fijará la temperatura máxima teórica que alcanzará el líquido refrigerante.

Poniendo de ejemplo el caso práctico realizado anteriormente, las aplicaciones posibles del calor disipado a una temperatura máxima de 70 °C serán necesariamente aplicaciones con temperaturas menores a 70 °C. Esta limitación, supondrá el complemento adicional de una bomba de calor que sea capaz de llevar el calor disponible a la temperatura requerida.

Por ello se diferenciarán dos aplicaciones distintas:

1. Aplicaciones con temperatura menor a la PCB

Requiere de caja de refrigeración de uno o más ASIC, bomba de recirculación del fluido e intercambiador de calor con circuito secundario.

2. Aplicaciones con temperatura mayor a la PCB

Requiere los elementos mencionados anteriormente, más la instalación de una bomba de calor en el circuito secundario (Ilustración 24).

Se verán a continuación en detalle las configuraciones para las dos aplicaciones disponibles, así como casos prácticos donde se pueda hacer uso de esta tecnología.

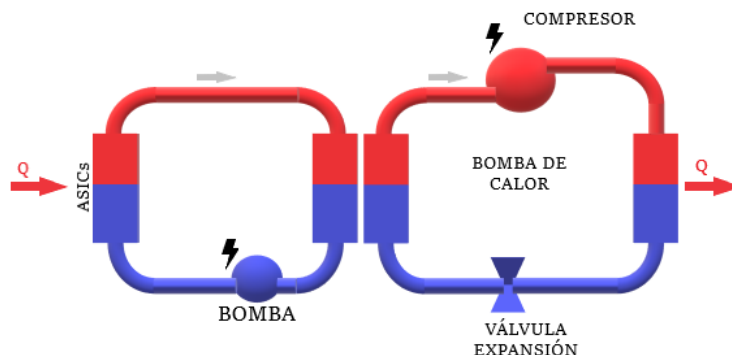


Ilustración 24: Circuito aplicación con bomba de calor.



## Aplicaciones con temperatura menor a la PCB

En esta primera aplicación, lo primero que se ha de tener en cuenta será la temperatura máxima de la placa base del minero. Dicha temperatura se puede comprobar en los datos técnicos del dispositivo que aporta el fabricante. Para el caso de los dispositivos del fabricante bitmain, se puede consultar en su página web (bitmain, 2023).

Comprobando los datos aportados por bitmain, la temperatura media máxima de los mineros se encuentra en 80 grados Celsius. Al ser esta la temperatura máxima, se quiere elegir una temperatura menor, con el fin de no acortar la vida útil de los mineros. Con el fin de facilitar el estudio, se ha escogido una temperatura límite de 70 grados Celsius.

### Aplicaciones

El uso de calor a temperaturas por debajo de 70 grados Celsius (°C) tiene diversas aplicaciones en una amplia gama de industrias y campos. A continuación, se muestran algunas aplicaciones comunes:

- **Cocina y Alimentos:** Muchos procesos de cocción y preparación de alimentos se realizan a temperaturas por debajo de 70 °C. Esto incluye técnicas de cocción lenta, pasteurización y blanqueo de alimentos. Estas temperaturas más bajas permiten cocinar los alimentos de manera uniforme y retener mejor los sabores y nutrientes.
- **Procesos de Secado:** En aplicaciones de secado, como en la industria de alimentos, agricultura o impresión, se pueden utilizar temperaturas moderadas para eliminar la humedad de los productos sin dañar su estructura.
- **Calefacción y agua caliente sanitaria:** Sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria, utilizan temperaturas por debajo de 70 °C para calentar y consumir agua caliente en edificios y sistemas industriales.
- **Procesos de Tratamiento de Agua:** En sistemas de tratamiento de agua, como la desinfección con calor, se pueden utilizar temperaturas moderadas para eliminar microorganismos y patógenos del agua potable o residual.
- **Industria Textil:** Esta industria, utiliza temperaturas moderadas para aplicar tratamientos a los materiales sin dañar su integridad en procesos de teñido, estampado o acabado textil.

Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones en las que el calor a temperaturas por debajo de 70 °C desempeña un papel importante. Cada una de estas aplicaciones requiere un control preciso de la temperatura para lograr resultados específicos.

### Circuito e instalación

La instalación necesaria para estos casos requiere de una bomba que haga recircular el refrigerante, una caja que contenga los mineros necesarios y un intercambiador de calor que conecte con el circuito secundario. El circuito secundario usará el líquido necesario



según la aplicación, pudiendo ser desde agua o aceite hasta aire que se necesite para calentar un proceso de secado. En la Ilustración 25 se muestra un esquema simplificado de los elementos de este circuito de recuperación de calor.

Los elementos mencionados anteriormente deberán de ser dimensionados acorde a las necesidades de calor del circuito secundario.

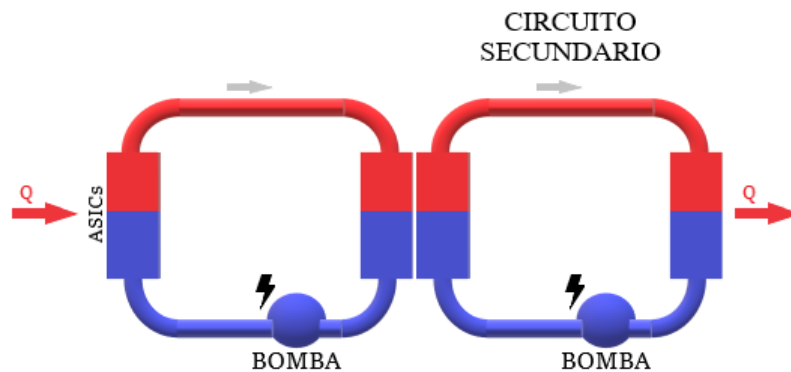


Ilustración 25: Esquema simplificado para aplicaciones con temperaturas menores a la PCB.

### Caso práctico

Se realizará a continuación, un caso práctico adaptado a una situación real de esta aplicación y el proceso seguido.

En una aplicación industrial, se necesitan 0,2 litros por segundo de aceite a 42 grados Celsius como lubricante. Durante el proceso de lubricación el aceite pierde 3,6 grados. Como se puede observar en este caso la temperatura necesaria para el circuito secundario no supera la temperatura máxima de 70 grados de la placa base.

Con las ecuaciones comentadas en el apartado Ecuaciones para intercambiadores de calor, se calcula el calor necesario para calentar dicho aceite.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,sal} - T_{f,ent}) \quad \dot{Q} = 0.18 * 2000 * (3.6) \approx 1300 \text{ W}$$

Conociendo el calor necesario, se busca un minero que consuma aproximadamente la misma cantidad de energía, ya que se calcula que casi el 100% de la energía consumida se convierte en calor.

Conociendo el calor que necesita el circuito secundario, se busca un intercambiador de calor que pueda suplir como mínimo dicha transferencia de calor (1300 W). En la Ilustración 26 se muestra el intercambiador de calor seleccionado, un intercambiador de placas en el cual los fluidos se cruzan a contracorriente.



Ilustración 26: Intercambiador de placas.

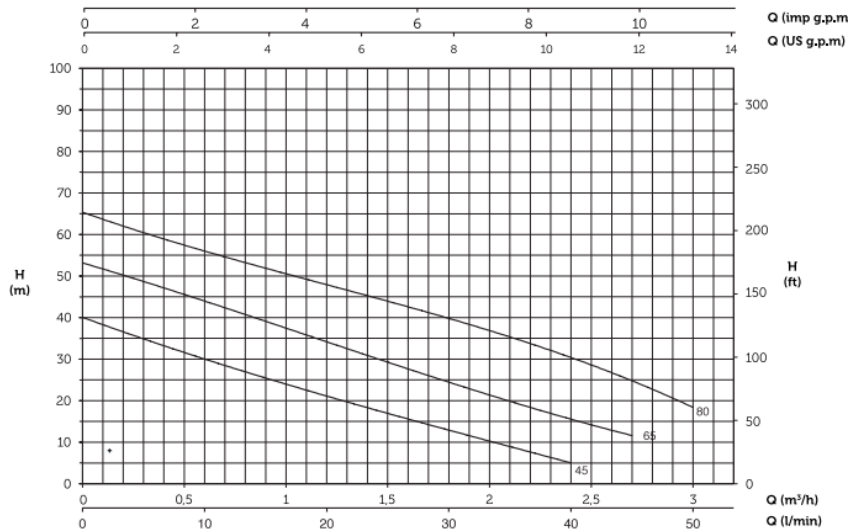
Según la ficha técnica del bitmain ANTMINER S9, el consumo del minero es de 1350 vatios, convirtiéndose en el candidato más eficiente en este rango de consumo con un hashrate de 14 terahashes por segundo (Th/s).

Escogido el minero se diseña las dimensiones de la caja. Se debe dejar el suficiente espacio para introducir el minero y poder acceder a él para su futuro mantenimiento. Por el contrario, si se diseña una caja con una sección mayor, más fluido refrigerante dieléctrico es necesario, no siendo recomendable ya que el gasto por litro de refrigerante se encuentra a 10 euros en la mayoría de los fabricantes del mercado. Los planos de la caja diseñada se adjuntan en el anexo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

A continuación, con la velocidad ideal calculada anteriormente y con la sección hidráulica de fluido, se calcula el caudal necesario de líquido refrigerante. Conociéndose todos los elementos del circuito, se saben las pérdidas hidráulicas del circuito, pudiéndose dimensionar el tamaño de la bomba necesaria. En las imágenes Ilustración 27 y Ilustración 28 se muestran las características de la bomba escogida, junto con su curva correspondiente de caudal-altura.

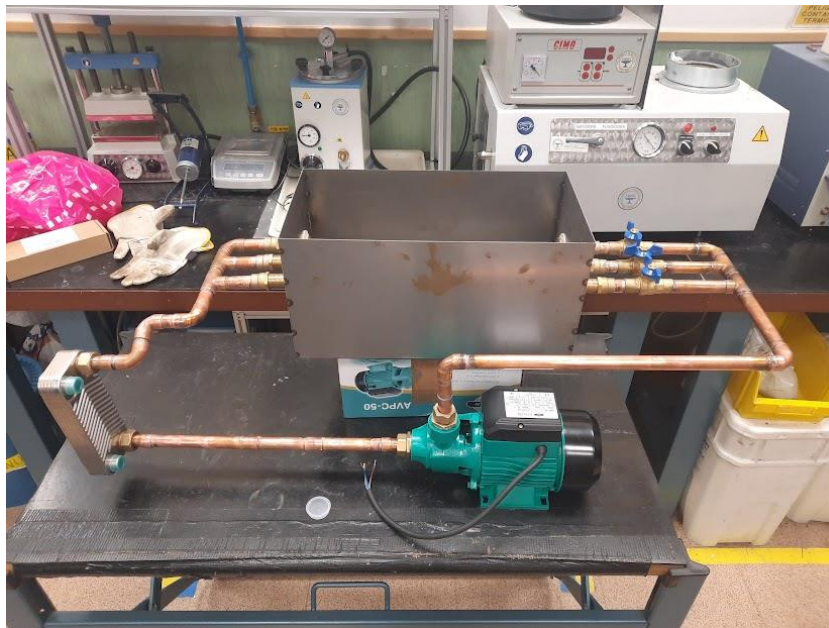


Ilustración 27: Características técnica bomba.



*Ilustración 28: Curva caudal altura bomba.*

Seleccionados todos los elementos, queda por último montar el circuito completo, uniendo todos los elementos con tuberías de cobre soldadas entre sí. En la Ilustración 29, se muestra el prototipo final construido para esta aplicación.



*Ilustración 29: Prototipo circuito completo recuperación de calor en aplicaciones de menor temperatura que placa PCB.*

En el apartado de Viabilidad económica sistema 1, se verán los posibles beneficios económicos de este sistema, respecto a los sistemas tradicionales que se utilizan actualmente en la industria.

## Aplicaciones con temperatura mayor a la PCB

Como se ha comentado anteriormente, la temperatura límite teórica que se puede alcanzar para es la temperatura máxima operativa del minero. Por tanto, esta temperatura no es suficiente para una gran mayoría de aplicaciones de calor en el mercado. Para suplir dicha necesidad, se ha de recurrir a un trabajo externo al minero, que aumente la temperatura hasta la necesaria.

La solución encontrada para aumentar la temperatura del fluido es la introducción en el circuito de una bomba de calor. En los siguientes apartados, se nombrarán las posibles aplicaciones de este nuevo circuito, junto a su funcionamiento teórico y la introducción de un caso práctico.

### Aplicaciones

Los líquidos a temperaturas superiores a 70 grados Celsius se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales. A continuación, se muestran algunas aplicaciones industriales comunes de líquidos a más de 70 °C:

- **Calefacción de Procesos Industriales:** Los líquidos calientes se utilizan en diversos procesos industriales para calentar materias primas, facilitar reacciones químicas o mantener condiciones específicas de temperatura.
- **Tratamiento Térmico de Metales:** En la industria metalúrgica, los líquidos a altas temperaturas se utilizan para realizar tratamientos térmicos como temple, recocido y revenido en piezas de metal para mejorar su resistencia y dureza.
- **Procesamiento de Alimentos:** En la industria alimentaria, los líquidos se utilizan a temperaturas elevadas para cocinar, pasteurizar, esterilizar y procesar alimentos, lo que prolonga la vida útil y mejora su seguridad.
- **Petróleo y Gas:** En la industria del petróleo y el gas, durante la destilación y refinación del petróleo crudo y para separar y procesar diferentes fracciones de hidrocarburos, se utilizan líquidos a temperaturas elevadas.

Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones industriales de líquidos a temperaturas superiores a 70 °C. La selección de la temperatura y el líquido específico depende de los objetivos del proceso y las propiedades de los materiales involucrados.

En la Tabla 7 se muestran algunos ejemplos de las bombas de calor en china (A comprehensive review on advances and applications of industrial heat, 2016).

Tabla 7: Ejemplos de aplicaciones de bombas de calor en China.

Industry	Process	Heat pump type	Heat supply temperature
Huabei oil field [100,115]	Crude oil transportation	Absorption heat pump	~80 °C
Liaohe oil field [102]	Crude oil transportation and space heating	Vapor compression cycle	55–60 °C
Daqin oil field [103]	Crude oil transportation and space heating	Vapor compression cycle	60–65 °C
Printing and dyeing [26]	Heating process of dyeing and soaping	Vapor compression cycle	95 °C
Printing and dyeing [27]	Wash-water heating and supply for boiler	Vapor compression cycle	85–90 °C
Printing and dyeing [104]	Heating process of dyeing	Vapor compression cycle	40–50 °C
Tobacco [105]	Tobacco heating	Vapor compression cycle	~68 °C
Tobacco [106]	Tobacco heating	Solar assisted heat pump	~80 °C
Salt [107,108]	Evaporation concentration	Vapor compression cycle	–
Rubber [109]	Condensation system heating	Absorption heat pump (Type II)	102 °C
Rubber [28]	Coagulator heating	Absorption heat pump (Type II)	110 °C
Power plant [110]	Back water heating	Absorption heat pump (Type I)	82 °C
Chemicals [111]	Polypropylene plant heating	Thermal vapor recompression cycle	–
Sludge [112]	Sludge drying	Solar heat pump	~85 °C
Chemicals [113]	Concentration of ammonium phosphate solution	Thermal vapor recompression cycle	–
Yoghurt [114]	Cleaning of product line	Vapor compression cycle	80–85 °C
Iron mine [115]	Antifreezing	Vapor compression cycle	–
Galvanizing line [116]	Process heating	Vapor compression cycle	70–75 °C

Como se observa en la tabla las aplicaciones son muy variadas, con diferentes tipos de bombas de calor y la temperatura de salida varía considerablemente según proceso.

### Circuito e instalación

La principal novedad de la instalación es el añadido al circuito mostrado en la Ilustración 25 una bomba de calor en el circuito secundario, como se muestra en la imagen Ilustración 30.

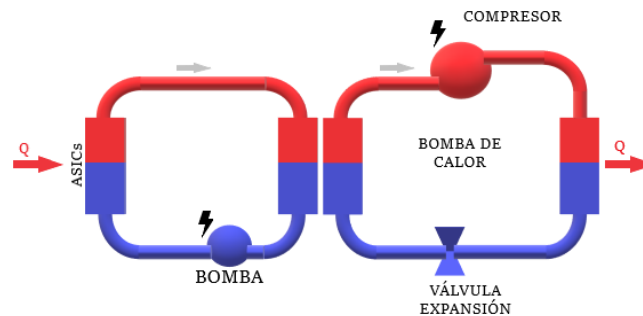


Ilustración 30: Circuito recuperación de calor en aplicaciones de temperatura mayor a PCB.

Una bomba de calor es un dispositivo termodinámico que utiliza energía para transferir calor de una fuente fría a una fuente caliente, con el fin de calentar o enfriar un espacio.

La bomba de calor utiliza un fluido refrigerante que circula en un ciclo cerrado, compuesto por cuatro componentes principales: evaporador, compresor, condensador y dispositivo de expansión.

El proceso de funcionamiento de una bomba de calor es el siguiente:

1. Evaporación: El fluido refrigerante absorbe calor del entorno frío, en este caso el intercambiador de calor del circuito primario, a través del evaporador. A medida que se calienta, se convierte en vapor de baja presión.
2. Compresión: El compresor aumenta la presión del vapor refrigerante, lo que también aumenta su temperatura. Esta etapa requiere energía para comprimir el gas.

3. Condensación: El vapor de alta presión y temperatura pasa a través del condensador, donde cede calor al entorno caliente. El refrigerante se enfría y se condensa en líquido.
4. Expansión: El líquido refrigerante de baja presión se expande a través del dispositivo de expansión, disminuyendo su temperatura y presión para prepararlo para el ciclo de evaporación nuevamente.

Las bombas de calor son eficientes energéticamente, ya que aprovechan la energía térmica existente en el entorno en lugar de generarla directamente. Son ampliamente utilizadas en sistemas de climatización residenciales, comerciales e industriales, ya que pueden ofrecer tanto calefacción como refrigeración utilizando un único dispositivo.



Ilustración 31: Circuito de una bomba de calor.

Existen ciertas limitaciones técnicas en el salto térmico que es capaz de inducir el compresor en el fluido. Se han realizado estudios examinando los rendimientos de la bomba de calor. En las bombas de calor el rendimiento de dicha bomba se mide con el indicador COP (Coefficient of performance [-]). Dicho índice, compara el calor térmico producido por la bomba de calor, con el trabajo que requiere la bomba. Con este indicador, se pueden comparar las eficiencias entre los diferentes tipos de bombas de calor.

En un estudio realizado con bombas de calor con agua como refrigerante (Large-scale heat pumps, 2020), se analiza el rendimiento de las bombas de calor con respecto al salto de temperatura inducido. En la Ilustración 32 se muestra una gráfica con los resultados obtenidos en el estudio mencionado anteriormente.

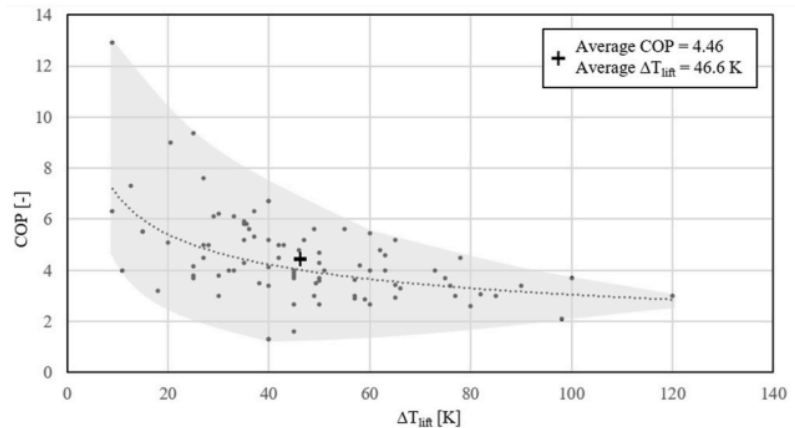




Ilustración 32: Función del COP respecto al salto de temperatura.

Como se puede comprobar, a medida que aumenta el salto térmico inducido en el refrigerante, disminuye el rendimiento de la bomba de calor. Si se quisiera aplicar dicho refrigerante al circuito secundario de la instalación del presente proyecto, se buscarán aplicaciones de saltos térmicos menores de 65 grados.

### Caso práctico

Se quiere introducir el sistema en un proceso de pintura. Se necesitan 321 kW de calor a 105 grados Celsius de temperatura para calentar la pintura para el proceso de tinte. Como refrigerante del circuito secundario se va a utilizar agua, ya que es de fácil obtención y no supone un riesgo a la salud ni al ambiente en caso de fuga. Este refrigerante es ideal en el caso de que se quiera utilizar directamente en el proceso, ya que muchas aplicaciones utilizan el agua (Estado vapor o líquido) como un elemento más del proceso.

Con estas necesidades de calor, se puede empezar a dimensionar el circuito de la bomba de calor. Se utilizará un ciclo simple de bomba de calor para no complicar el proyecto, con el fin de comprobar primeramente la viabilidad del proyecto. Siguiendo el ciclo ideal, Ilustración 33, se conocen los puntos 1 y 3 de la instalación.

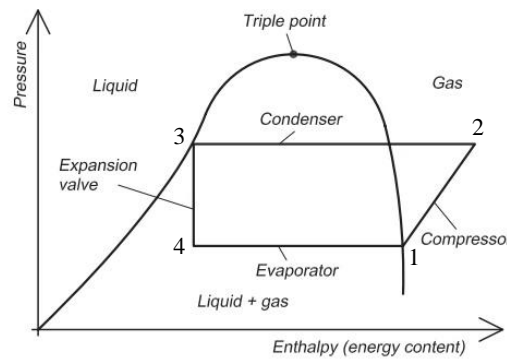


Ilustración 33: Ciclo ideal diagrama p-h bomba de calor.

Conocidos los valores marcados en negrita en la Tabla 8, se pueden obtener de las tablas de las propiedades del agua confeccionadas a partir del código Engineering Equation Solver (EES), el resto de los valores mostrados en la tabla. Se ha escogido una temperatura de entrada de 65 grados en la instalación debido a la limitación que tienen los mineros de calentar por encima de 70 °C.

Tabla 8: Propiedades del agua como refrigerante puntos 1 y 3 de la bomba de calor.

	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Entalpía	Entropía	Tipo
Punto 1	<b>65</b>	0,2504	2617,5	7,8296	<b>Vapor saturado</b>
Punto 3	<b>105</b>	1,224	440,29	-	<b>Líquido saturado</b>

Conocidas las propiedades de los puntos 1 y 3 se confecciona la Tabla 9 de los puntos 2 y 4. Siguiendo la Ilustración 33 se obtienen las propiedades marcadas en negrita en la tabla. Se ha de tener en cuenta que en este ciclo ideal los procesos son los siguientes:

- 1-2: Compresión isentrópica
- 2-3: Cesión de calor isobárica
- 3-4: Expansión isoentálpica
- 4-1: Absorción de calor isobárica

Con dichas propiedades, y siguiendo los procesos, se obtendrán las restantes propiedades de los puntos 2 y 4.

Tabla 9: Propiedades del agua como refrigerante puntos 2 y 4 de la bomba de calor.

	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Entalpía	Entropía	Tipo
Punto 2	219,9	<b>1,224</b>	2919,16	<b>7,8296</b>	Vapor sobresaturado
Punto 4	<b>65</b>	<b>0,2504</b>	<b>440,29</b>	-	Mezcla

Conociendo las entalpías de todos los puntos del circuito y el trabajo necesario a realizar por el condensador, se calcula el gasto másico del sistema.

$$\dot{m} = \frac{W}{h_3 - h_2} = \frac{321 \text{ kW}}{440,29 - 2914,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,129 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (14)$$

Obtenido el gasto másico del sistema se puede calcular por el mismo procedimiento los trabajos realizados por el compresor y evaporador.

$$W_{\text{compresor}} = \dot{m} \times (h_2 - h_1) = 38,49 \text{ kW} \quad (15)$$

$$W_{\text{evaporador}} = \dot{m} \times (h_1 - h_4) = 282,51 \text{ kW} \quad (16)$$

Obtenido el calor necesario en el evaporador, se obtiene el número necesario de mineros que se necesitaría para dicha instalación. Para este caso se quiere escoger uno de los mineros más eficientes del mercado debido al tamaño de la instalación y la búsqueda de la eficiencia. Se escoge el minero de bitmain Antminer S19 XP.

Dicho minero consume 3010 vatios de potencia eléctrica, asumiendo que toda esa energía se convierte en calor aprovechable a su temperatura de PCB, se necesitaría una instalación de 94 ASIC. Como se puede observar, para este tipo de aplicaciones industriales, se requieren granjas de minería profesionales y no una instalación doméstica de uno o varios mineros.

## Conclusiones

Si se quiere aprovechar el calor disipado de los mineros para aplicaciones industriales, se requiere una inversión inicial importante. En el caso de que la industria se pudiera ubicar cerca de una granja de minado ya existente, el proceso e instalación inicial sería un ahorro muy considerable, ya que el precio de los mineros presenta el mayor costo inicial.



## Capítulo 3: Viabilidad económica

Con el fin de realizar un proyecto económicamente viable, uno de los objetivos principales del proyecto, se deben de analizar todas las partes desde el punto de vista económico.

Para ello es clave analizar los usos finales que se le pueden dar a este método alternativo de generación de calor y a la tecnología que sustituye. Debido a la diferencia de instalaciones según la aplicación final, se dividirá el análisis en dos partes, tal y como se ha hecho previamente.

Ambas aplicaciones contienen parámetros que se conocen y otros que son totalmente inciertos. Por tanto, la rentabilidad de la instalación variará según las condiciones del momento de la instalación y de los precios de las diferentes externalidades a lo largo del tiempo.

Para realizar el estudio se han de tener en cuenta los siguientes parámetros.

- **Instalación inicial:** El equipo de mayor coste en la inversión es el ASIC. Estos varían en precio según la rentabilidad del mercado. Cuando la demanda de la criptomoneda es mayor, estos también aumentan su precio respectivamente. En el resto de los elementos como la valvulería y las tuberías no se pueden apreciar grandes variaciones de precio como en los mineros.
- **Precio del bitcoin:** A pesar de ser una moneda que busca ser un resguardo de valor, al estar en sus fases iniciales de creación, la volatilidad de su precio sigue siendo considerable. Como se puede observar en la Ilustración 34, el precio del bitcoin fluctúa constantemente sin poder hacer una predicción a futuro segura.



Ilustración 34: Evolución precio Bitcoin el último año a agosto 2023.

- **Precio de la electricidad:** Se han de tener en cuenta las diferencias de precio según el momento del día, dependiendo de la tarifa contratada y los precios generales del mercado eléctrico.
- **Precio del combustible:** Aunque este sea el precio más estable en el tiempo, es posible que sucedan crisis globales que afecten el precio de este.

## Viabilidad económica sistema 1

En este primer apartado se analizará la viabilidad económica de un sistema con aplicaciones menores a la PCB. Para ello se tomará de base el caso práctico presentado en el apartado (Caso práctico).

### Precio inversión inicial

La inversión inicial de esta primera instalación cuenta con los diferentes elementos expuestos en la Tabla 10

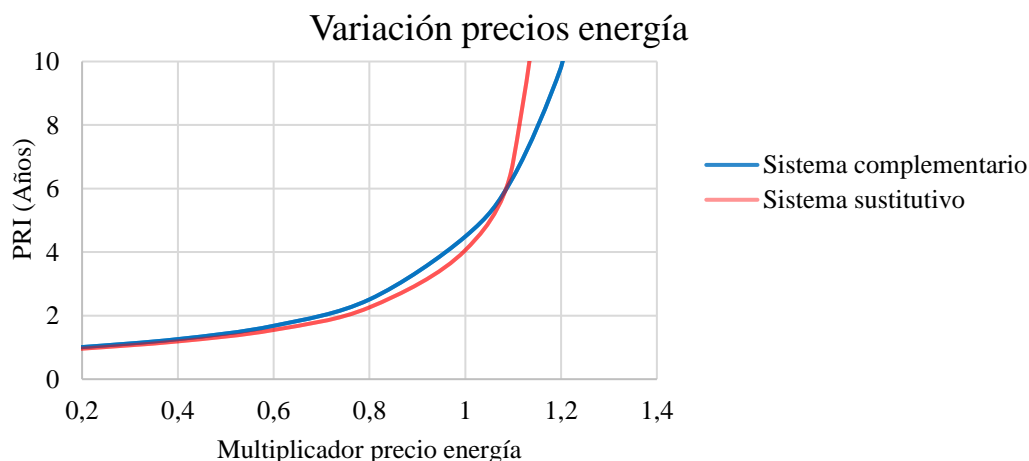
Tabla 10: Inversión inicial circuito refrigeración.

Equipo	Precio [€]
Bitmain Antminer S19 XP	3.800
Líquido refrigerante dieléctrico (20 L)	200
Bomba dieléctrico	35
Intercambiador de calor	29
Valvulería y tuberías	83
Chapa aluminio (Tanque)	10
<b>Total</b>	<b>4.157</b>

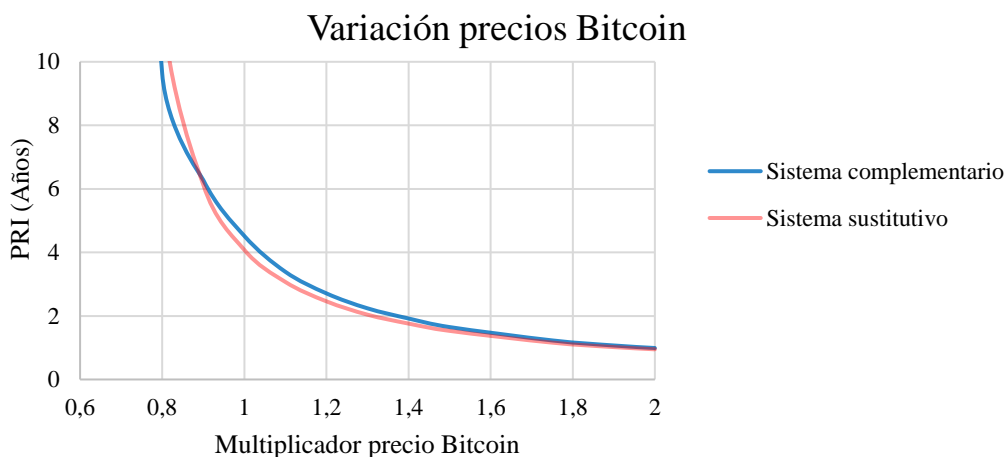
### Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

Se ha hecho un análisis en Excel donde se han introducido todos los datos de coste de funcionamiento de la instalación, el ahorro que supone respecto a tener una instalación convencional y el beneficio obtenido del bitcoin.

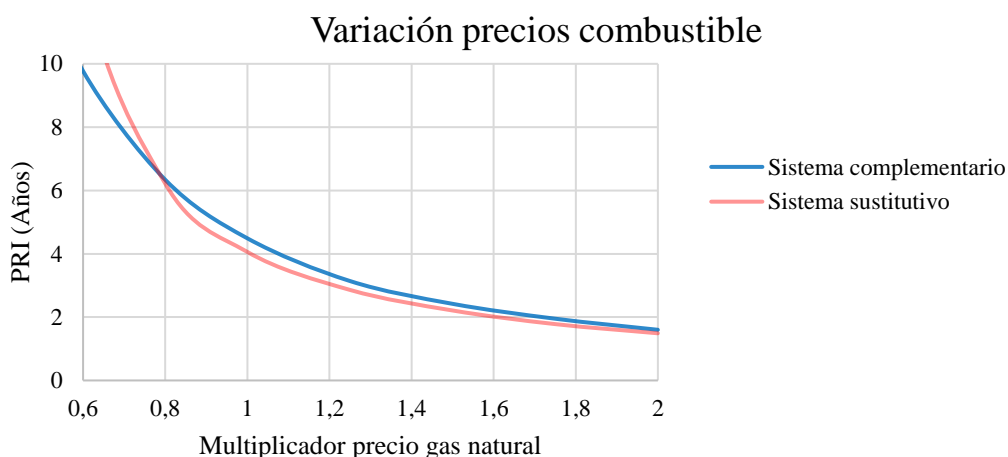
Se ha comparado la variabilidad de cada uno de los tres parámetros (Precio electricidad, precio bitcoin, precio combustible) en las siguientes gráficas. En cada gráfica de la Gráfica 35 a la Gráfica 37 se comparará la instalación como sustituta a la instalación existente y otra como instalación complementaria, pudiendo operar la tradicional, en los momentos que no sea rentable operar el minero.



Gráfica 35: Rentabilidad de la instalación según precio de la electricidad.



Gráfica 36: Rentabilidad de la instalación según precio del bitcoin.



Gráfica 37: Rentabilidad de la instalación según precio del combustible.

Como precios base, se han tomado los precios actuales del mercado a agosto de 2023, de todos los parámetros.

- Precio electricidad: 0,152 [€/kWh]
- Precio bitcoin: 24000 [€/Bitcoin]
- Precio Gas Natural: 0,065 [€/kWh]

Con los valores actuales la recuperación de la inversión (PRI) media es de 3,7 años con un sistema complementario y de 4,1 años en un sistema de sustitución completa.

Se puede comprobar como con los precios actuales (Multiplicador =1), no hay una gran diferencia entre los diferentes tipos de instalaciones, sin embargo, a medida que los precios se vuelven menos rentables, es conveniente disponer de la instalación como complementaria a la existente ya que habrá momentos del día según costos de electricidad, o momentos del año, por bajadas del valor del bitcoin, que la instalación sea más costosa que la existente y no convenga usarla.

## Viabilidad económica sistema 2

En este segundo apartado se analizará la viabilidad económica de un sistema con aplicaciones de temperatura mayores a la PCB, con una bomba de calor complementaria. Para ello se tomará de base el caso práctico presentado en el apartado (Caso práctico).

### Precio inversión inicial

Para dicho caso práctico se creen necesarios 94 mineros en vez de 1. Adicionalmente se le añade el compresor de la bomba de calor, junto con el nuevo intercambiador necesario en el circuito secundario.

Tabla 11: Inversión inicial circuito refrigeración con bomba de calor.

Equipo	Precio [€]	Unidades
Bitmain Antminer S19 XP	3.800	94
Líquido refrigerante dieléctrico (20 L)	200	30
Bomba dieléctrico	2500	1
Intercambiador de calor	355	2
Valvulería y tuberías	83	30
Chapa aluminio (Tanque)	10	94
Compresor	20.000	1
<b>Total [€]</b>		<b>389.840</b>

Tabla 12: Inversión inicial circuito refrigeración con bomba de calor con mineros existentes.

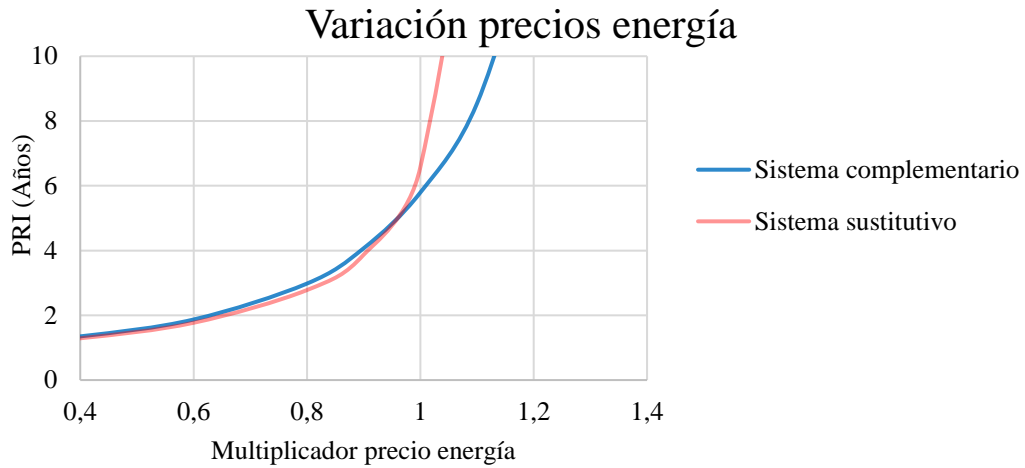
Equipo	Precio [€]	Unidades
Bitmain Antminer S19 XP	3.800	-
Líquido refrigerante dieléctrico (20 L)	200	30
Bomba dieléctrico	2500	1
Intercambiador de calor	355	2
Valvulería y tuberías	83	30
Chapa aluminio (Tanque)	10	94
Compresor	20.000	1
<b>Total [€]</b>		<b>32.640</b>

Como se puede comprobar el incentivo por encontrar una aplicación industrial cerca de una granja de mineros ya existente es sustancial, disminuyendo la inversión inicial un 92%.

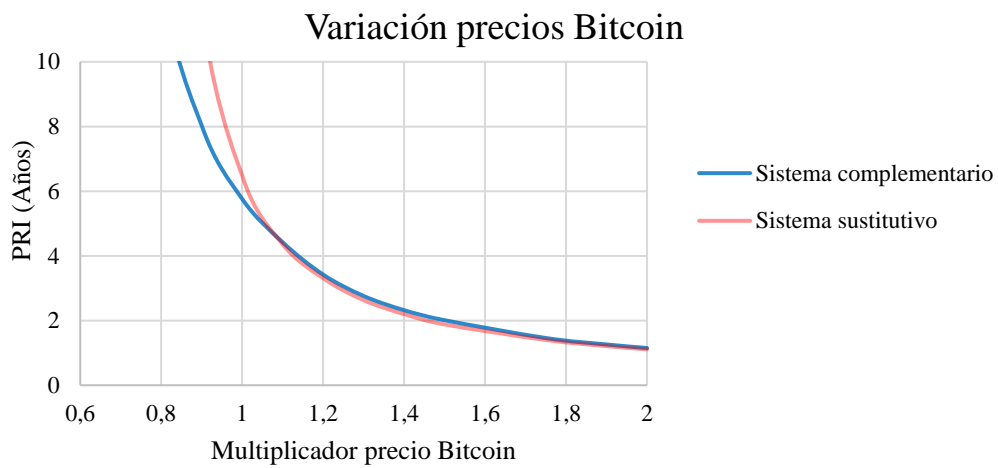
A pesar de esto, se estudiará la rentabilidad económica del primer caso, con una instalación totalmente nueva.

### Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

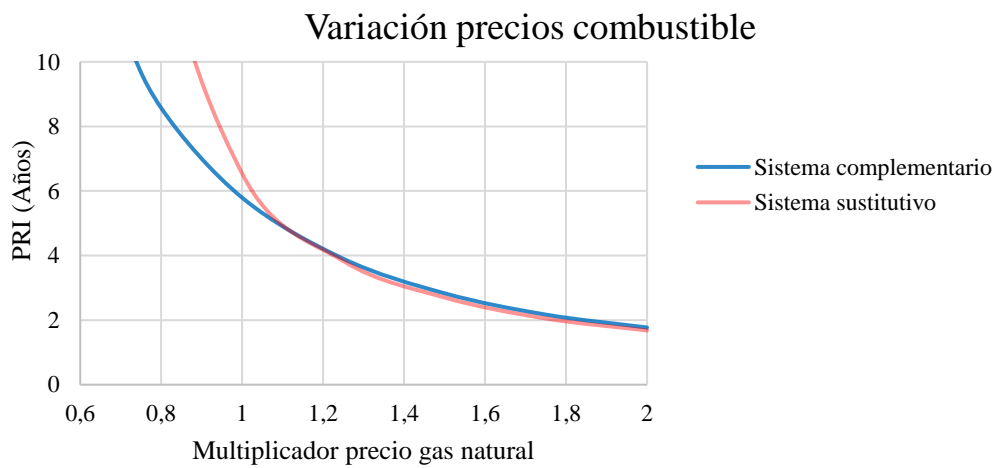
El procedimiento a seguir es el mismo que en el caso anterior. Se compararán las variaciones del PRI en función de los precios energéticos y de la moneda.



Gráfica 38: Rentabilidad de la instalación según precio de la electricidad – sistema 2.



Gráfica 39: Rentabilidad de la instalación según precio del bitcoin – sistema 2.






Gráfica 40: Rentabilidad de la instalación según precio del combustible – sistema 2.

Comparando con el ejercicio anterior, se comprueba que los límites son mucho más ajustados para los precios actuales. Se ha de tener en cuenta, que la probabilidad de la variación en un parámetro u otro varía. No se considera igual de probable que el gas natural aumente su precio en más del doble durante un periodo alargado de tiempo, por otro lado, en el caso de que el bitcoin aumentará su valor, aunque sea por un periodo corto de tiempo, provoca que el PRI se reduzca considerablemente.

Esta perspectiva incita a pensar que hay un margen para la especulación con el valor del bitcoin para dicha instalación, ya que, en el caso de la presente instalación, solo haría falta un valor del bitcoin superior a los 60.000 euros durante 9 meses para rentabilizar por completo toda la instalación.

Destacar que la rentabilidad de estos equipos de minería sin aprovechar su calor presenta tiempos de recuperación de la inversión inicial de pueden ser muy grandes o incluso nulos. La Ilustración 41 muestra las ganancias obtenidas por una granja de minería en la actualidad.

	1 DÍA	1 SEMANA	1 MES
 Ingreso	0.03317709 BTC 797.06 EUR	0.23037332 BTC 5534.59 EUR	0.98801270 BTC 23736.46 EUR
 Coste elec.	0.04239347 BTC 1018.48 EUR	0.29675426 BTC 7129.36 EUR	1.27180398 BTC 30554.38 EUR
 Ganancia	-0.00921638 BTC -221.42 EUR	-0.06638094 BTC -1594.77 EUR	-0.28379128 BTC -6817.93 EUR

*Ilustración 41: Rentabilidad diaria de 94 bitmain Antminer S19 XP.*

Se observa, como se ha mencionado anteriormente, que en este caso no solo no se recuperaría la inversión si no que se tendrían pérdidas diariamente.

## Conclusiones y trabajos futuros

Finalizado el trabajo completo, se pueden obtener varias conclusiones. Durante el curso del proyecto, se ha querido demostrar como todo el calor desaprovechado por los mineros se le puede dar una utilidad. A través de métodos analíticos de transmisión de calor, mecánica de fluidos y de simulaciones de CFD se logró generar un modelo de recuperación de calor.

El proyecto demuestra la viabilidad económica de los sistemas de recuperación de calor presentados. Estos resultados son de particular importancia en la industria del minado de criptomonedas, ya que el calor desechado en los procesos de minado, podría ser rentabilizado y dado un uso, aumentando así la rentabilidad económica de la inversión.

Es importante destacar que, si bien se logró demostrar la rentabilidad en este estudio, cabe destacar que se ha hecho únicamente de manera experimental, sin enfrentarse al comportamiento del sistema al mundo real ni al largo plazo. Por ello, el futuro brinda la oportunidad de poder implementar el estudio en una aplicación real.

Este TFM subraya la importancia de la eficiencia energética y su papel en el contexto doméstico e industrial, destacando la necesidad de aprovechar todos los gastos térmicos posibles. Como resultado, se espera a futuro una mayor implementación de estos sistemas en el campo de minado de criptomonedas.





## Referencias

- (2016). *A comprehensive review on advances and applications of industrial heat*.
- Ansys. (11 de 08 de 2023). *Ansys Products Fluid*. Obtenido de <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- bitmain. (7 de Noviembre de 2022). *support bitmain*. Obtenido de <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/360005088914-Miner-normal-operating-temperature-range>
- bitmain. (16 de Agosto de 2023). *BITMAIN SUPPORT*. Obtenido de <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/360005088914-Miner-Normal-Operating-Temperature-Range>
- BIXBIT. (s.f.). *Medium*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2022, de <https://medium.com/@bixbit.official/killers-of-the-mining-equipment-getting-rid-of-noise-and-dust-540813fec81c#:~:text=On%20average%2C%20ASIC%20generates%2075dB,generated%20by%20a%20private%20jet.>
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2004). *Transferencia de calor y masa*. McGrawHill.
- CRIPNOTICIAS. (s.f.). *criptonoticias.com*. Recuperado el 19 de Febrero de 2023, de <https://www.criptonoticias.com/mineria/como-extender-vida-util-equipo-mineria-asic/>
- DCX Immersion. (s.f.). *dcx*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2022, de <https://dcx.eu/>
- DIGICONOMIST. (n.d.). *digiconomist*. Retrieved from <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- Economía 3. (s.f.). *economia3*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2022, de <https://economia3.com/halving-definicion/#:~:text=A1%20momento%20de%20lanzar%20el,redujo%20a%206%2C25%20BTC.>
- ENGINEERED FLUIDS. (15 de Agosto de 2023). *Productos bitcool Engineered Fluids*. Obtenido de <https://www.engineeredfluids.com/products/bitcool/>
- Investopedia. (s.f.). *Application-Specific Integrated Circuit (ASIC) Miner*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2022, de <https://www.investopedia.com/terms/a/asic.asp>
- (2020). *Large-scale heat pumps*.
- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 08 de Noviembre de 2022, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- noisess. (s.f.). *noisess*. Recuperado el 19 de Febrero de 2023, de <https://www.noisess.com/blog/page/2/>
- Tri Nguyen, A. H. (2018).

Vries, A. (n.d.). *ScienceDirect*. Retrieved 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121000830>

# Anexo I: Código fuente MATLAB

```
%% Trabajo Final de Máster

%% Parámetros y constantes

% Fluido dieléctrico (BitCool BC-88)

k_die_40=0.1396;      % Conductividad térmica a 40 °C [W/m*K]
k_die_100=0.1373;    % Conductividad térmica a 100 °C [W/m*K]

sigma_die_40=8.3e-06; % Viscosidad cinemática a 40 °C [m2/s]
sigma_die_100=2.6e-06; % Viscosidad cinemática a 100 °C [m2/s]

Cpe_die_40= 2054;    % Calor específico a 40 °C [J/Kg*K]
Cpe_die_100=2203.2; % Calor específico a 100 °C

densidad_die= 820;   % Densidad a 15,8 °C [Kg/m3]

Pr_die_40=sigma_die_40/(k_die_40/(densidad_die*Cpe_die_40));
Pr_die_100=sigma_die_100/(k_die_100/(densidad_die*Cpe_die_100));

Te_die= 48;         % Temperatura de entrada al intercambiador [°C]
%Ts_die= 38+273;    % Temperatura de salida del intercambiador [K]

v_die= 0.007428;    % Velocidad media fluido [m/s]
A_die= 0.2*0.2;     % Área estimada recipiente (dim S9 350x135x158 mm)
Q_die= v_die*A_die; % Caudal fluido dieléctrico

m_die= Q_die*densidad_die; % Flujo másico [Kg/s]

% Aceite
%k_oil
%sigma_oil
Cpe_oil= 2000;      % Calor específico a 40 °C [J/Kg*K]
Te_oil= 38;         % Temperatura de entrada al intercambiador [°C]
Ts_oil= 42;         % Temperatura de salida del intercambiador [°C]

densidad_oil= 900; % Densidad a 15,8 °C [Kg/m3]

Q_oil= 0.0002;     % Caudal fluido (Caudal de un grifo 0,2 [l/s]) [m3/s]

m_oil= Q_oil*densidad_oil; % Flujo másico [Kg/s]

%% Intercambio de calor Dieléctrico-Aceite

rend_int=1;        % Rendimiento intercambiador

q_oil= m_oil*Cpe_oil*(Ts_oil-Te_oil); % Calor absorbido por el aceite
q_die=q_oil*rend_int;
Ts_die=Te_die-q_die/(m_die*Cpe_die_40); % Temperatura salida

%% Intercambio de calor ASIC-Dieléctrico

P_asic = 1300;     % Potencia eléctrica del ASIC [W]

% Dimensiones placa ASIC S9 [Ancho Largo Alto] [m]
a_placa=0.124;    % Ancho placa [m]
L_placa=0.270;    % Longitud aprox placa de chips [m]
A_placa=a_placa*L_placa;

T_chip = 70;      % Temperatura media del chip en operación [°C]
T_die_med=45;     % Temperatura media del fluido [°C]

% Parametros del fluido según T [Interpolación]
T_prop=(T_chip+T_die_med)/2; % Temperatura de propiedades del fluido
k_prop=k_die_40+(k_die_100-k_die_40)/60*(T_prop-40);
sigma_prop=sigma_die_40+(sigma_die_100-sigma_die_40)/60*(T_prop-40);
Cpe_prop=Cpe_die_40+(Cpe_die_100-Cpe_die_40)/60*(T_prop-40);
Pr_prop=Pr_die_40+(Pr_die_100-Pr_die_40)/60*(T_prop-40);

% Tipo de flujo según Reynolds
```

```

Re_critico=5e05;      % Reynolds crítico
X_critica=Re_critico*sigma_prop/v_die; % Longitud crítica cambio de régimen
Re_limite=v_die*L_placa/sigma_prop;   % Reynolds en el límite

% Normalmente flujo laminar
% Nusselt por Churchill & Ozoe [ReL*Pr>110]
Nu_medio=(0.6774*(Re_limite)^0.5*(Pr_prop)^(1/3))/(1+(0.0468/Pr_prop)^(2/3))^(1/4);
h_medio=Nu_medio*k_prop/L_placa;

% Aletas
% Geometría
w_f=0.018;          % Largo base aleta [m]
t_f=0.002;          % Ancho base aleta [m]
A_k=w_f*t_f;        % Área base aleta [m2]
p_f=2*(w_f+t_f);    % Perímetro base [m]
L_f=0.02;           % Alto aleta [m]
A_f=A_k+2*(w_f+t_f)*L_f; % Área convectiva aleta
N_f_c=6;            % Número de aletas en bloque
N_c_p=63;           % Número de bloques en placa
k_f=229;            % Conductividad aleta aluminio

% Potencia evacuada
% Aleta
m=(h_medio*p_f/(k_f*A_k))^(0.5);
M=(T_chip-T_die_med)*(h_medio*p_f*k_f*A_k)^0.5;
q_f=M*(sinh(m*L_f)+(h_medio/(m*k_f)*cosh(m*L_f)))/(cosh(m*L_f)+(h_medio/(m*k_f)*sinh(m*L_f)));
rend_f=q_f/(h_medio*A_f*(T_chip-T_die_med));
A_t=0.0346-N_f_c*N_c_p*A_k+N_f_c*N_c_p*A_f;
rend_total=1-6^63*A_f/A_t*(1-rend_f);
q_placa_lado=h_medio*A_t*rend_total*(T_chip-T_die_med);
q_total=q_placa_lado*6;

% Cambio Temp en dieléctrico
Ts_die_asic=1300/(m_die*Cpe_prop)+T_die_med;

```