



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

APLICACIÓN DEL MÉTODO SERT PARA
ANALIZAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA
DEL COMPUTADOR AL VARIAR VOLTAJE Y
FRECUENCIA DEL PROCESADOR

USING THE SERT TOOLSET TO ANALYZE
THE COMPUTER ENERGY EFFICIENCY
UNDER PROCESSOR OVERCLOCKING AND
UNDERVOLTING

Autor:

Pablo Orduna Lagarma

Director:

Víctor Viñals Yúfera

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Ingeniería Informática

2020

Resumen

El acelerado proceso de digitalización que está teniendo lugar a nivel global ha llevado a un creciente interés en la optimización de la eficiencia energética de los sistemas informáticos. Esto plantea el complejo reto de cuantificar dicha eficiencia. Es por ello que en los últimos años se han dado grandes pasos en el desarrollo de *benchmarks* capaces de puntuar un sistema informático en base a su eficiencia energética cuando es sometido a una carga de trabajo típica. La suite SERT de la cooperativa SPEC una de las herramientas más reconocidas, hasta el punto de ser recientemente adoptada por la agencia de protección medioambiental de Estados Unidos (EPA) para el programa Energy Star de certificación energética de servidores (Version 3.0, ENERGY STAR Computer Server Specification, junio 2019).

En este trabajo se realiza un estudio experimental de eficiencia energética en una plataforma Skylake-X de Intel, experimentando con el procesador i7 7800X sobre la placa ASUS Rampage VI Extreme Omega, seleccionada por su facilidad de cambio de frecuencias y tensiones de alimentación. En primer lugar se han realizado pruebas de estabilidad de sistema, seguidas de una caracterización de la potencia consumida por el procesador al variar tensión de alimentación, frecuencia y temperatura. Se ha puesto un gran interés en la temperatura, ya que se trata de una variable difícil de controlar e infravalorada en otros estudios experimentales. Se han comentado en detalle los resultados, así como las anomalías con respecto a los modelos teóricos de consumo en tecnología CMOS. Además se han propuesto explicaciones, tanto físicas como microarquitectónicas, para dichas anomalías.

Posteriormente se ha realizado un análisis de la eficiencia energética de la plataforma mediante la SERT Suite haciendo uso un conjunto de diferentes combinaciones de tensión de alimentación y frecuencia, entre las cuales se encuentra la frecuencia de fábrica del procesador, así como configuraciones que hacen uso de *overclocking* y *undervolting*. De esta manera, se comentan los resultados en cuanto a las configuraciones más óptimas, hablando en un principio de la mejor configuración para un uso equilibrado entre CPU, memoria y almacenamiento, seguido de las configuraciones óptimas para cargas de trabajo centradas en cada uno de los tres componentes mencionados.

Finalmente se propone una metodología alternativa para medir la eficiencia centrada en una carga de trabajo de CPU mucho más intensa que la impuesta por la SERT Suite. Se aporta también un análisis mediante el uso de este método sobre el mismo conjunto de configuraciones usadas al aplicar el método SERT, buscando la mayor eficiencia energética bajo una carga de trabajo realmente intensa en términos de CPU.

Abstract

The accelerated process of digitalization that is currently taking place globally has led to a growing interest in optimizing the energy efficiency of computer systems, which in turn poses the complex challenge of quantifying such efficiency. This is why in recent years great strides have been made in the development of benchmarks capable of rating a computer system on the basis of its energy efficiency when faced with a typical workload. The SERT suite from SPEC is one of the most recognized tools, to the point that it was recently adopted by the United States EPA for the Energy Star program for server energy certification (Version 3.0, ENERGY STAR Computer Server Specification, June 2019).

In this work, an experimental study of energy efficiency on an Intel Skylake-X platform is carried out, experimenting with the i7 7800X processor on the ASUS Rampage VI Extreme Omega motherboard, selected for its ease of changing frequencies and power supply voltages. Firstly, system stability tests were carried out, followed by a characterization of the power consumed by the processor when varying the supply voltage, frequency and temperature. A great interest has been put in temperature, since it is a variable difficult to control and underestimated in other experimental studies. The results have been explained in detail, as well as the anomalies with respect to the theoretical models of consumption in CMOS technology. In addition, explanations have been proposed, both physical and micro-architectural, for these anomalies.

Subsequently, an analysis of the energy efficiency of the platform has been carried out by means of the SERT Suite using a set of different combinations of supply voltage and frequency, among which is the factory frequency of the processor, as well as configurations that make use of *overclocking* and *undervolting*. In this way, the results are discussed in terms of the most optimal configurations, discussing at first the best configuration for a balanced use between CPU, memory and storage, being followed by the optimal configurations for workloads centered on each of the three components mentioned.

Finally, an alternative methodology is proposed to measure efficiency, centered on a much more intense CPU workload than the one imposed by the SERT Suite. It is also provided an analysis using this method on the same set of configurations used when applying the SERT method, looking for the highest energy efficiency under a really intense workload in terms of CPU.

Índice

1. Introducción	4
1.1. Estructura del trabajo	7
2. Estudio sobre la potencia consumida por el procesador Intel i7 7800X	8
2.1. Carga de trabajo y método	9
2.2. Pruebas de estabilidad	11
2.3. Espacio de experimentación para la medida de potencia	13
2.4. Potencia dinámica y estática	15
2.4.1. Potencia total vs. tensión de alimentación, frecuencia y temperatura	15
2.4.2. Importancia de la potencia estática	16
2.4.3. Potencia total vs. frecuencia	18
2.4.4. Potencia total vs. temperatura	19
2.4.5. Potencia dinámica vs. temperatura y voltaje	20
2.4.6. Potencia estática vs. temperatura	22
2.4.7. Anomalías	23
2.5. Conclusiones	27
3. Experimentos sobre la eficiencia energética en SERT Suite	29
3.1. SERT Suite	29
3.1.1. Despliegue Hardware	30
3.1.2. Requisitos Hardware	30
3.1.3. Diseño de los Worklets	30
3.1.4. Sincronización	32
3.1.5. Toma de medidas y cálculo de puntuaciones	32
3.2. Metodología	36
3.3. Resultados	37
3.4. Eficiencia energética en Prime95	40
3.5. Conclusiones	42
4. Conclusiones y trabajo futuro	44
4.1. Trabajos futuros	45
5. Anexo I: Comparativa de sistemas de refrigeración	47
5.1. Introducción	47
5.2. Comparativa	48
5.3. Conclusiones	50
5.4. Resultados del montaje	50
Referencias	52

1. Introducción

Resumen

En este capítulo se exponen los elementos que motivan este trabajo, así como la plataforma experimental (sistema bajo estudio e instrumentación), y los distintos conjuntos de programas de prueba. Se anticipan los experimentos a realizar y se comenta en detalle la importancia del control de la temperatura. Finalmente se resumen los objetivos del trabajo y la estructura del documento.

El proceso global de digitalización y la conciencia medioambiental creciente se están sumando para mejorar el rendimiento energético de los sistemas informáticos. Independientemente del mercado (móvil, tabletas, servidores, etc.) el procesador *multicore* es una de las claves en de rendimiento y consumo. Pero para mejorar la eficiencia es necesario poder cuantificarla de forma estandarizada, usando programas de prueba e instrumentación asequibles para organismos oficiales, empresas o investigadores. La cooperativa SPEC (*Standard Performance Evaluation Corporation*) es el protagonista principal, gracias a la creación de los programas y procedimientos SPECpower_ssj2008 y SERT (*Server Efficiency Rating Tool*).

En este Trabajo Fin de Grado se busca realizar un estudio de la variación de la potencia consumida en la generación Skylake-X de Intel (14nm, 2017), haciendo uso para ello de una placa ASUS Rampage VI Extreme Omega con un procesador i7 7800X, y un sistema de refrigeración Cooler Master Masterliquid ML360R para conseguir un gran control sobre la temperatura.

La optimización de la eficiencia energética es un tema de vital importancia en la actualidad. Por ejemplo, en el ámbito de los centros de datos, el más mínimo beneficio en cada uno de los servidores supone un enorme impacto en el total del centro. Además, optimizar la eficiencia energética de los centros de datos permite reducir su crecimiento desenfrenado de consumo de electricidad, el cual en 2012 ya conformaba el 2% (300TWh/año) del consumo eléctrico global y que se estima que alcanzará el 13% en 2030 como consecuencia de los avances tecnológicos y el rápido proceso de digitalización global[4].

Es por ello que en los últimos años ha surgido un creciente interés por la complicada tarea de medir la eficiencia energética, siendo un gran hito la creación del primer benchmark de eficiencia energética, SPECpower_ssj2008, en 2008 por parte de SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation)[18].

Dicho benchmark mide la eficiencia de un sistema en base a su comportamiento al ser sometido a la realización de operaciones transaccionales, las cuales imitaban el funcionamiento de un centro logístico. Poco después de su salida, en 2009, la *EPA* (Environmental Protection Agency) del departamento de energía de los Estados Unidos, comunicó al comité SPECpower la petición de crear una nueva herramienta para la realización de mediciones de eficiencia energética, lo cual resultaría en la creación de *SERT* (Server Efficiency Rating Tool) Suite, que fue lanzado en 2013.

SERT Suite es una herramienta formada por un conjunto de tests, entre los cuales se encuentra el benchmark completo de SPECpower_ssj2008, creada con la finalidad de abarcar un mayor rango de casos de uso, mediante el planteamiento de nuevos métodos para estresar el procesador y la inclusión de benchmarks menos dependientes de la CPU, para tener en cuenta también el rendimiento de la memoria y el almacenamiento.

En 2019, la EPA pasó a establecer a SERT Suite como el único método aceptado para la obtención de certificaciones energéticas y la Unión Europea adoptó una normativa, que finalmente entró en vigor en marzo de 2020, para establecer requisitos energéticos sobre el diseño ecológico de servidores basándose en la utilización de SERT Suite[10].

Por tanto, en este Trabajo Fin de Grado vamos a utilizar la suite SERT, realizando previamente un análisis en profundidad de su funcionamiento y sistema de puntuaciones (Capítulo 3).

El sistema usado para la realización de las pruebas consiste en en la placa base Asus Rampage VI Extreme Omega y el procesador i7 7800X (2017, 14nm, serie Skylake-X). Se han instalado una memoria DRAM de 32GB, distribuida en 4 zócalos, con la finalidad de poblar todos los canales de memoria disponibles. Los procesadores pertenecientes a la serie X combinan características de las líneas de escritorio y servidores de Intel, por lo que, a pesar de que se trata de un procesador principalmente anunciado para su uso en videojuegos, tiene grandes similitudes a nivel de arquitectura con los procesadores de la línea Xeon, que es la serie de servidores de Intel. Además, la combinación de placa y procesador usados permiten un control muy preciso sobre las variables de voltaje y frecuencia, lo cual es necesario para la realización de las pruebas planteadas y no suele encontrarse presente en la mayoría de las configuraciones orientadas a servidores.

Por otra parte se ha hecho uso del analizador de corriente Newtons4th PPA-500[8] junto con una borna repartidora colocada entre la placa y la CPU para poder medir la potencia consumida por el procesador, tal y como se muestra en la figura 1.

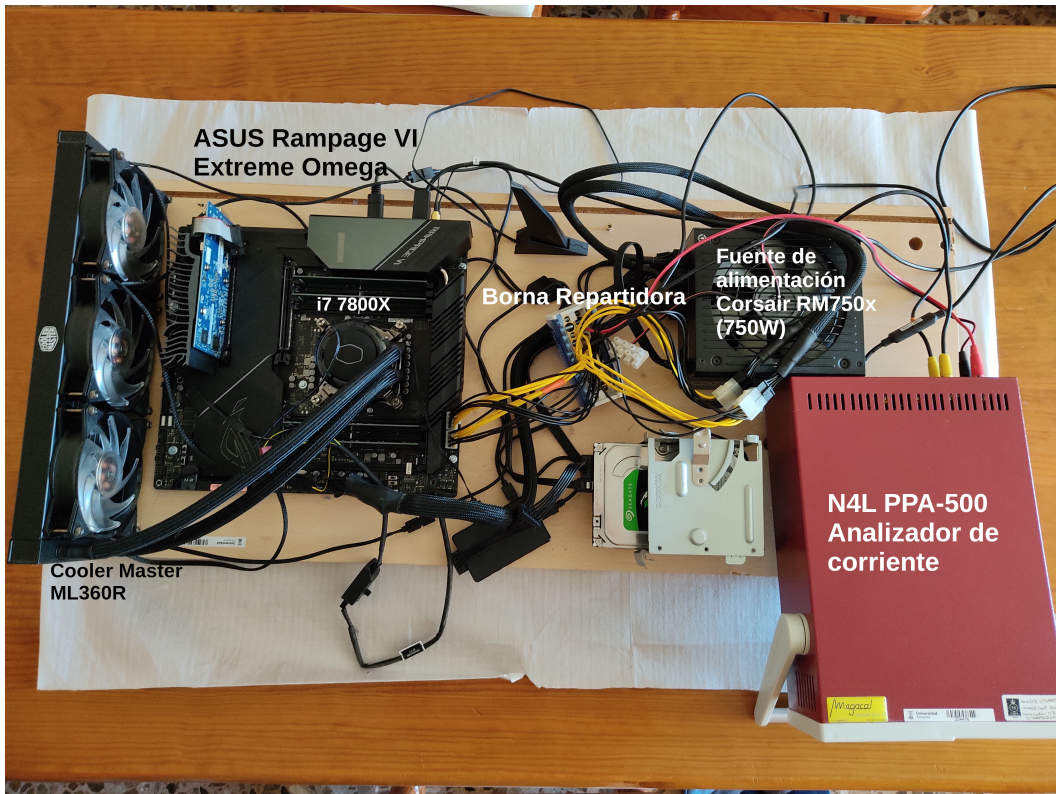


Figura 1: Material usado para la realización de las diferentes pruebas

Además, dicho vatímetro se encuentra certificado para su uso en SERT Suite, lo cual es necesario para la ejecución del los tests.

De forma preliminar, antes de empezar con la experimentación sistemática, se realizaron pruebas específicas para estudiar variación de la potencia estática con respecto de la temperatura, continuando la caracterización experimental desarrollada en el Trabajo Fin de Grado realizado por M. Crisan [12], comprobando que estaba muy limitada por el uso de un sistema de refrigeración por aire con muy poca capacidad de control de temperatura a consumos elevados.

Para solventar este problema se ha utilizado un sistema de refrigeración líquida, consiguiendo así la precisión necesaria para el control de la temperatura, que resulta realmente útil para la realización de pruebas en el rango superior de tensiones y frecuencia.

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en referencia a la potencia estática se narran a lo largo del Capítulo 2, mientras que la toma de decisiones e instalación referente al sistema de refrigeración líquida se

comenta en el Anexo 1.

Desde un punto de vista más general, los objetivos concretos fijados para la realización de este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Realización de un análisis de estabilidad para determinar las configuraciones que pueden ser usadas para el resto de pruebas.
- Realización de experimentos y toma de medidas variando frecuencia, voltaje y temperatura.
- Análisis de la variación de la potencia estática y dinámica con respecto a la temperatura, tensión de alimentación y frecuencia.
- Comprensión del procedimiento seguido por los *tests* de la suite SERT, así como de su sistema de puntuación.
- Realización y análisis de pruebas haciendo uso de SERT Suite.
- Repetición del estudio de eficiencia con Prime95, destacando el cambio en el régimen óptimo de trabajo con cargas elevadas.

1.1. Estructura del trabajo

El Capítulo 2 se centra en los experimentos de medida de potencia (dinámica y estática) variando en rangos grandes la frecuencia, tensión de alimentación y temperatura, en configuraciones estables. Se explican las tendencias experimentales con los modelos teóricos de consumo en tecnología CMOS. Para entender las anomalías reportadas se recurren a fenómenos de segundo orden en tecnología CMOS de canal corto o a posibles reacciones de la microarquitectura.

En el Capítulo 3 se hace uso de la SERT Suite de SPEC para obtener puntuaciones de eficiencia energética en varias configuraciones de tensión de alimentación y frecuencia, buscando y encontrando las configuraciones óptimas para diferentes casos de uso. Además, se comenta la importancia de los resultados obtenidos en el capítulo anterior en la puntuación obtenida en SERT Suite y se propone un nuevo método para medir la eficiencia de un sistema informático a cargas altas haciendo uso de Prime95.

En el último Capítulo se aportan las conclusiones de este trabajo y se sugieren algunas vías de continuación.

2. Estudio sobre la potencia consumida por el procesador Intel i7 7800X

Resumen

En este capítulo se realiza un análisis en profundidad del consumo del procesador Intel i7 7800X, determinando su reacción en términos de potencia y temperatura frente a frecuencia y tensión de alimentación, y separando en la potencia total sus componentes dinámica y estática. Primero se presenta la metodología experimental y se realiza un estudio de estabilidad del procesador en un espacio amplio de tensiones y frecuencias. Después se escoge un subconjunto de configuraciones para estudiar en detalle la potencia total con respecto a la tensión, temperatura y frecuencia. Terminamos modelando la dependencia de la potencia estática y dinámica con la temperatura y proponiendo posibles explicaciones a las anomalías encontradas en algunos resultados con respecto a la teoría.

En el ámbito de la experimentación en consumo con una máquina real cabe destacar los trabajos recientes realizados por parte de Henry Wong[21] y Marius Crisan[12], haciendo uso de procesadores de la generación Sandy Bridge e Ivy Bridge de Intel en el caso de Wong y Skylake-X en el caso de Crisan.

Sin embargo, se puede apreciar una clara escasez de estudios experimentales en este ámbito y, además, una notable falta de preocupación por la relación entre la potencia y la temperatura en los estudios existentes. Dicha falta de preocupación puede venir explicada por el hecho de que SERT, la herramienta referente para la realización de mediciones de eficiencia energética, no es especialmente exigente en términos de temperatura, hasta el punto de que las puntuaciones resultantes podrían ser cuestionables en equipos cuyo caso de uso requiriese de la ejecución de una carga de trabajo intensa a altas temperaturas, tal y como se comenta en el Capítulo 3.

A lo largo de la sección 2.1 se detalla el procedimiento seguido para la realización de las medidas de potencia. En la sección 2.2 se hablará de la estabilidad de las diferentes combinaciones de tensión de alimentación y frecuencia probadas. Posteriormente, en la sección 2.3 se presenta el espacio de experimentación escogido para la realización de las medidas. Finalmente, en la sección 2.4 se muestran los resultados obtenidos en los experimentos realizados, junto con un análisis en profundidad de las diferencias presentes con respecto del modelo teórico esperado.

2.1. Carga de trabajo y método

En primer lugar se establecen los valores de frecuencia y voltaje deseados en el panel de configuración de la BIOS del ordenador y se inicia el sistema operativo Windows, donde se modificará la configuración del sistema de refrigeración, mediante la aplicación AI Suite 3, para conseguir estabilizar el sistema a una determinada temperatura. Para ello se establece que el sistema de refrigeración debe mantenerse al mínimo cuando se encuentre el procesador por debajo de la temperatura deseada y al máximo cuando se supere dicha temperatura.

Posteriormente se inicia una instancia de Prime95, con la finalidad de asegurar que la configuración es estable y para conseguir que el sistema de refrigeración se caliente, de manera que al iniciar las mediciones pueda alcanzarse dicha temperatura de una manera más rápida, consiguiendo así unos mejores resultados en las mediciones. Cabe destacar que se establece que Prime95 use 12 hilos, con la finalidad de ocupar por completo los 6 núcleos del procesador, consiguiendo así mantener la carga de CPU al 100%.

Para su ejecución se hace uso de la opción que ajusta el tamaño de las estructuras de datos para llenar todas las caches del procesador, la cual, según los desarrolladores, es la que resulta en un mayor consumo.

La decisión de usar Prime95 viene dada por la detección de errores durante la ejecución, incluida en la herramienta, gracias a la cual se pueden detectar fallos en configuraciones inestables que podrían pasar desapercibidos con un software ad-hoc de estrés térmico.

Una vez se alcanza dicha temperatura se configura la ejecución de una nueva instancia de Prime95 a través de la herramienta VTune Amplifier de Intel, la cual se ejecutará durante 3 minutos, y, a la vez, se toman medidas de potencia haciendo uso del vatímetro. El vatímetro realiza una medición por segundo, de manera que, pasados los 3 minutos, se obtienen 180 muestras, con las cuales se obtiene un único valor a partir de la mediana de dicho conjunto de valores.

Además, durante las mediciones, se toman a su vez medidas de la temperatura de la CPU con la herramienta HWInfo, con la finalidad de poder ver si la temperatura se mantiene correctamente a la que se debería encontrar en cada uno de los conjuntos de pruebas.

Durante la toma de mediciones se comprueba constantemente que los valores mostrados en el vatímetro coinciden con los registrados por a nivel software, para poder detectar cualquier problema de comunicación que pudiese influenciar los resultados.

Finalmente se comprueba que el valor de IPC ofrecido por la herramienta VTune Amplifier se encuentra en el orden de los obtenidos en el resto de

las mediciones, para poder identificar mediciones que hayan podido ser interrumpidas por otros procesos del sistema o por la activación de mecanismos de estrangulamiento térmico.

Una vez se han obtenido todos los datos, se realiza el tratamiento con Python utilizando Numpy y Scipy, y se dibujan las gráficas haciendo uso de la biblioteca Matplotlib.

En la figura 2 se muestra un diagrama que muestra el flujo de acciones descrito para la realización de las mediciones a modo de resumen.

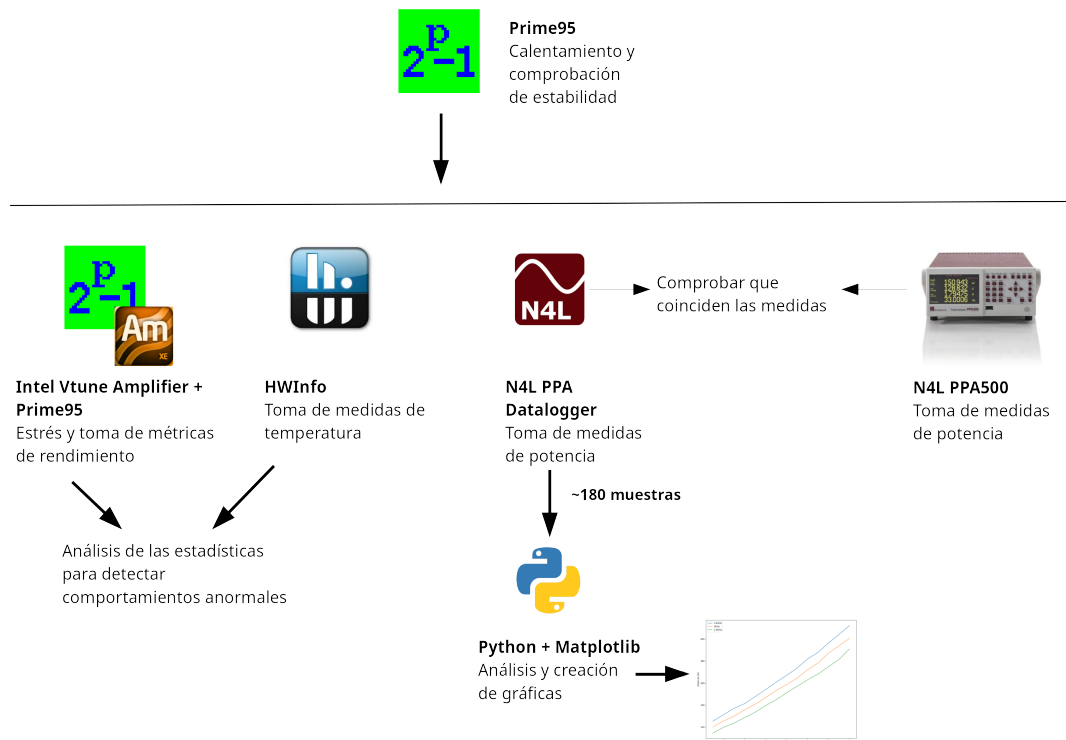


Figura 2: Diagrama representando el flujo de acciones seguido en la realización de las mediciones

2.2. Pruebas de estabilidad

Inicialmente hemos realizado pruebas de estabilidad para ver la respuesta del procesador frente a diferentes configuraciones de voltaje y frecuencia.

Para ello hemos seguido el método descrito anteriormente hasta la primera ejecución de Prime95, donde se comprueba la estabilidad de la configuración probada. Hemos decidido considerar como *estable* una configuración de tensión y frecuencia si ejecuta Prime95 sin errores de ningún tipo durante 10 minutos.

Para controlar la temperatura en estas pruebas de estabilidad, hemos utilizado el modo estándar que ofrece la aplicación AI Suite 3 para el control del sistema de refrigeración Cooler Master ML360L conectado a la placa madre ASUS Rampage VI Extreme Omega. Dicho modo establece para los ventiladores la curva que se muestra en la figura 3.

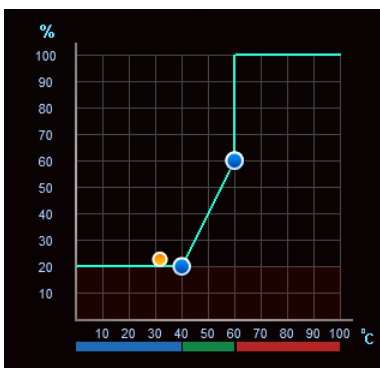


Figura 3: Configuración estándar de los ventiladores en AI Suite 3

Esta curva significa que los ventiladores se encuentran al 20% de su velocidad máxima cuando la CPU está a menos de 40°C. Entre 40°C y 60°C se aumenta de manera lineal la velocidad entre el 20% y el 60% y, una vez llegue el procesador a los 60°C, trabajan a máxima velocidad.

Con este modo hemos comprobado que la temperatura varía entre los 40°C en las frecuencias más bajas y 75°C cuando se hace uso de frecuencias y voltajes relativamente altos.

En la figura 4 se muestra un resumen de las estabilidad de las diferentes configuraciones de voltaje y frecuencia probadas en un diagrama de Shmoo[5]. Una casilla verde claro significa que la configuración es estable, una casilla verde oscuro representa la configuración óptima, es decir, la mayor frecuencia para un voltaje determinado y el menor voltaje para una frecuencia determinada, y las casillas rojas son configuraciones inestables.

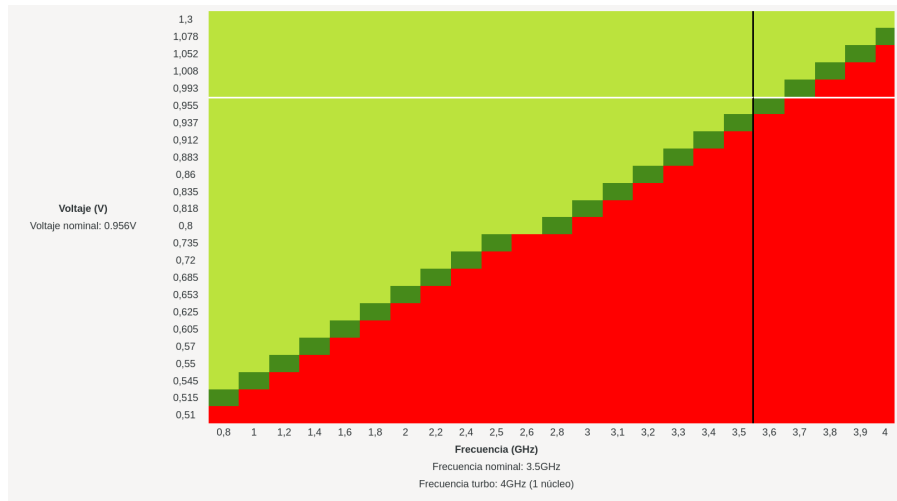


Figura 4: Diagrama de Shmoo. Estabilidad de las parejas voltaje-frecuencia.

Como puede observarse la separación entre valores consecutivos de tensión o frecuencia no siempre es constante, ya que se adapta a la búsqueda de las configuraciones óptimas mencionadas. Se ha indicado con una línea blanca y una línea negra el voltaje y frecuencia nominales, respectivamente. De esta manera, se considera que se está haciendo uso de *undervolting* si la celda se encuentra por debajo de la línea blanca y *overclocking* si se encuentra a la derecha de la línea negra. Las configuraciones funcionales más extremas encontradas en este experimento corresponden a las parejas (0,505V-800MHz) y (1,3V-4GHz), la primera ya cercana a la tensión umbral de los transistores y la segunda cercana a los límites de la refrigeración de nuestro sistema de enfriamiento.

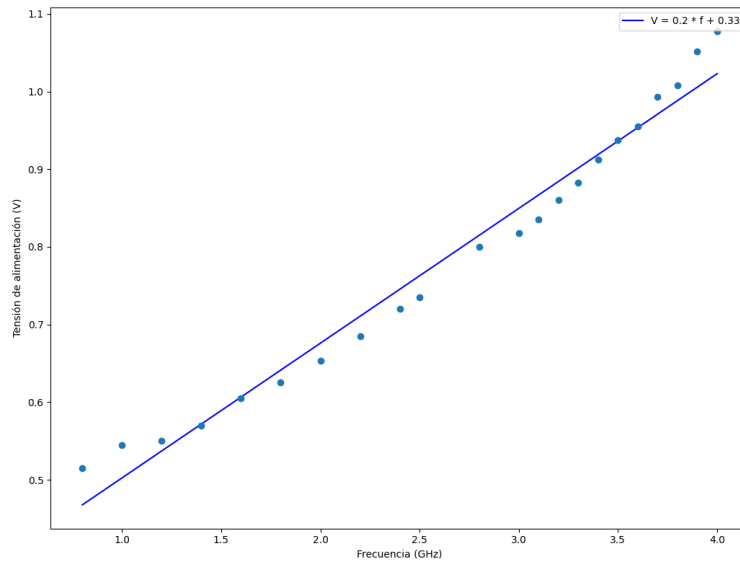


Figura 5: Relación entre el voltaje y la frecuencia en las configuraciones estables óptimas

Por otra parte, se ha realizado una gráfica que relaciona tensión de alimentación y frecuencia para las configuraciones óptimas obtenidas. De esta manera se busca comprobar que la relación entre ambas variables es lineal, tal y como establece el modelo teórico.

La gráfica resultante se presenta en la figura 5, donde se muestra también la recta a la que se asemeja la relación entre voltaje y frecuencia en los puntos óptimos, obtenida mediante la realización de una regresión lineal.

Para comprobar la linealidad de dicha relación comprobamos que el coeficiente de correlación entre los puntos y la recta obtenida es cercano a 1. En este caso dicho coeficiente es de **0,9876**, por lo que podemos concluir que la relación entre ambas variables se asemeja a una función lineal.

2.3. Espacio de experimentación para la medida de potencia

Para caracterizar la variación de la potencia estática con la temperatura es necesario medir la potencia total variando frecuencia, voltaje y temperatura. Para estresar la CPU hemos hecho uso también de Prime95, con las mismas opciones usadas en las pruebas de estabilidad. El espacio de expe-

rimentación considerado aparece en la Tabla 1. Las temperaturas se han variado en incrementos de 5°C mediante el ajuste manual de la velocidad de los ventiladores. Para ello se ha establecido, mediante el uso de la herramienta AI Suite 3 de ASUS, que los ventiladores se encuentren trabajando al mínimo si la temperatura del procesador se encuentra por debajo del valor deseado y al máximo en el caso de que se encuentre por encima.

Tabla 1: Tensiones, frecuencias y temperaturas donde se ha medido potencia total. Los rangos de temperatura indican inferior-superior, con incrementos de 5°C.

	0,800V	0,993V	1,078V	1,300V
0,8GHz	-	45°C	45°C - 50°C	-
1,0GHz	-	45°C	45°C - 50°C	-
1,2GHz	-	45°C - 55°C	45°C - 55°C	-
1,4GHz	-	45°C - 55°C	45°C - 55°C	65°C
1,6GHz	-	45°C - 60°C	45°C - 55°C	65°C - 70°C
1,8GHz	-	45°C - 60°C	45°C - 55°C	65°C - 75°C
2,0GHz	45°C - 60°C	45°C - 65°C	45°C - 75°C	65°C - 80°C
2,2GHz	45°C - 60°C	45°C - 70°C	45°C - 80°C	65°C - 80°C
2,4GHz	45°C - 60°C	45°C - 80°C	50°C - 80°C	70°C - 80°C
2,6GHz	45°C - 60°C	45°C - 80°C	50°C - 80°C	75°C - 80°C
2,8GHz	45°C - 60°C	50°C - 80°C	55°C - 80°C	80°C
3,0GHz	-	55°C - 80°C	55°C - 80°C	-
3,2GHz	-	55°C - 80°C	55°C - 80°C	-
3,4GHz	-	55°C - 80°C	60°C - 80°C	-
3,6GHz	-	60°C - 80°C	65°C - 80°C	-
3,7GHz	-	60°C - 80°C	-	-
3,8GHz	-	-	70°C - 75°C	-
4,0GHz	-	-	70°C	-

Para cada una de las combinaciones de frecuencia y voltaje (46 combinaciones) se ha repetido la ejecución con el mayor número de temperaturas posibles, con una separación de 5°C. Por ejemplo, en la configuración (3,6GHz-0,956V), muy próxima a la nominal, hemos podido experimentar las temperaturas (60°C, 65°C, 70°C, 75°C y 80°C): el sistema de refrigeración no podía bajar de 60°C a su máxima capacidad, y en ningún caso hemos permitido subir de los 80°C para preservar la integridad del procesador.

En cada experimento hemos realizado mediciones de potencia cada se-

gundo durante 3 minutos en los que se ha mantenido la CPU al 100% de carga. De esta manera se obtienen 180 valores para la potencia, a partir de los cuales, haciendo uso de la mediana, se obtiene el valor definitivo para cada combinación, con la finalidad de dar mayor precisión estadística a los resultados.

2.4. Potencia dinámica y estática

En primer lugar, nos centraremos en una visión general de la variación de la potencia con respecto de la temperatura, tensión de alimentación y frecuencia. Posteriormente comentaremos la presencia de la potencia estática en los resultados obtenidos, seguido de un análisis de la potencia total, con respecto de la frecuencia y con respecto de la temperatura. Posteriormente realizamos un desglose de la potencia total y hablamos de las variaciones de la potencia dinámica con respecto de la temperatura y el voltaje, y de la potencia estática con respecto de la temperatura. Finalmente, se comentan las anomalías que nos hemos encontrado en los resultados obtenidos y proponemos una posible explicación para cada uno de ellos.

2.4.1. Potencia total vs. tensión de alimentación, frecuencia y temperatura

La figura 6 muestra los valores de potencia total obtenida a partir de la mediana del conjunto de datos medido (eje Y) en función de la frecuencia del procesador (eje X). Los cuatro grupos de líneas corresponden a los cuatro voltajes usados (de 1,3V a 0,8V, de arriba a abajo). Dentro de cada grupo, cada línea corresponde a una temperatura que se ha mantenido constante (de 80°C a 45°C con saltos de 5°C, también de arriba a abajo).

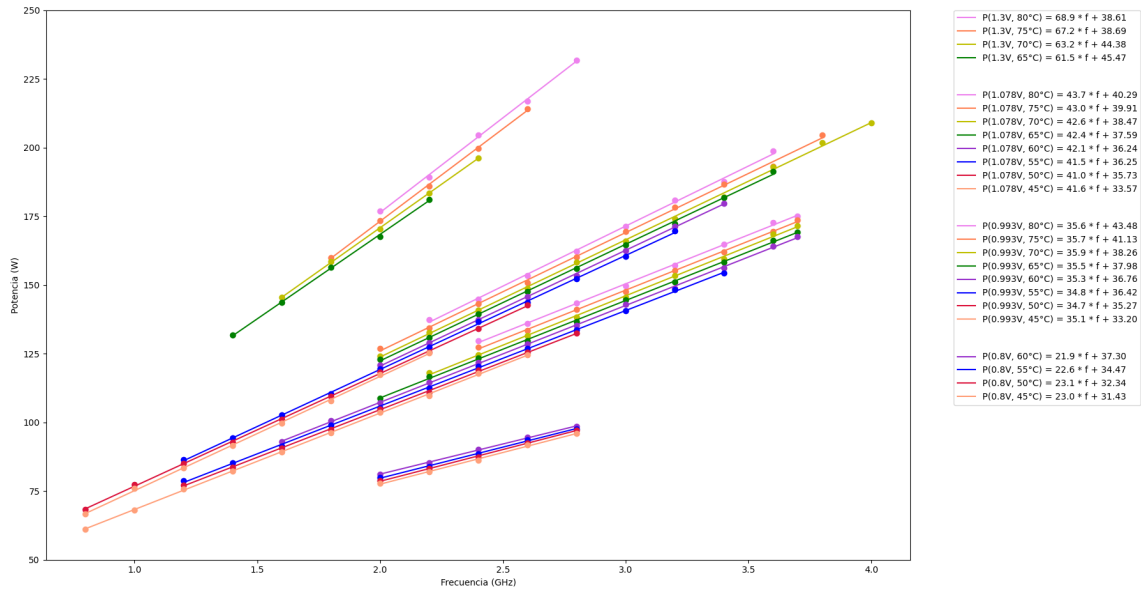


Figura 6: Potencia con respecto de la frecuencia con voltaje constante a 0,8V, 0,993V, 1,078V y 1,3V y temperatura constante entre 45°C y 80°C

Como puede verse, el espacio experimental recoge una gran variación en la potencia total, desde los 60W por debajo del GHz con (0,993V, 45°C) hasta los 230W a 4GHz con (1,078V, 80°C). Este último valor es realmente grande para este procesador, cuyo TDP¹ es de 140W.

El cruce de las líneas con la vertical de frecuencia 0 corresponde a la potencia disipada con el reloj *parado*, es decir, a la potencia estática. Su valor en Watios se refleja en los términos independientes de las ecuaciones de la figura 6.

2.4.2. Importancia de la potencia estática

En el mercado de procesadores de altas prestaciones es necesario utilizar transistores rápidos en las rutas críticas, lo cual lleva a canales cortos, con tensiones umbral (V_{TH}) relativamente pequeñas. Pero esta rapidez de conmutación lleva aparejada la existencia de corrientes de fuga notables, especialmente a altas temperaturas [5]. Para ver este efecto, en la figura 7 se presenta el porcentaje de potencia estática frente a potencia total, con

¹Thermal Design Power (TDP) represents the average power, in watts, the processor dissipates when operating at Base Frequency (3.50 GHz) with all cores active under an Intel-defined, high-complexity workload.[6]

un formato similar al de la figura 6. Para facilitar la inspección hemos seleccionado únicamente las temperaturas más extremas para cada voltaje de alimentación, uniendo los experimentos que comparten las mismas (V_{DD} , T) con líneas.

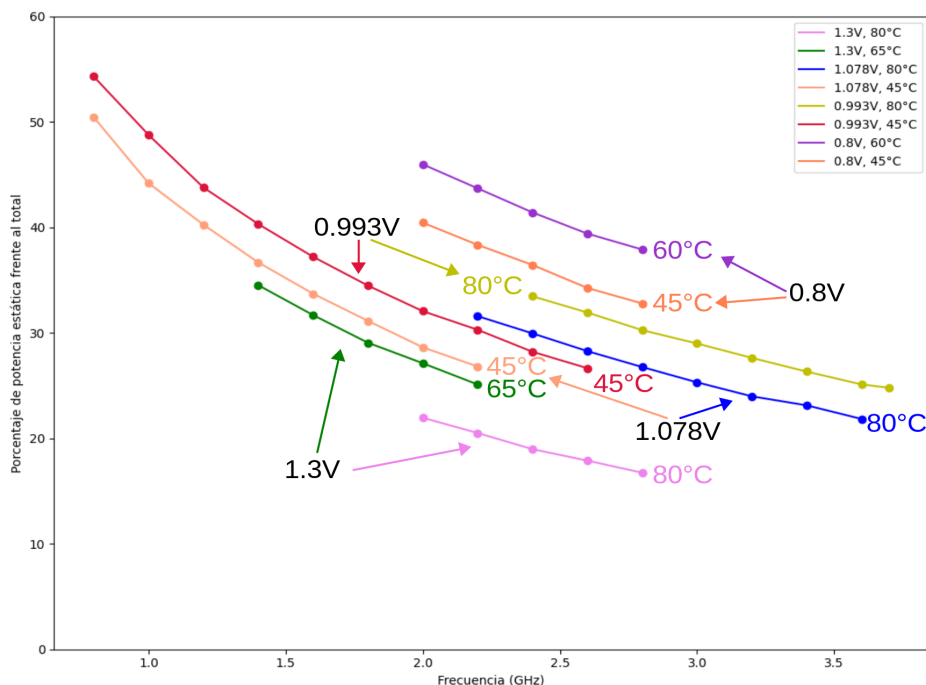


Figura 7: Porcentaje de potencia estática sobre el total de potencia dinámica para las cuatro tensiones de alimentación y las temperaturas más extremas.

Como puede verse en la gráfica, la potencia estática en ningún caso baja del 17% y llega a superar el 55%. Cerca de las condiciones nominales (0,993V y 1,078V @ 3,6GHz) observamos porcentajes del 25% y 22% a 80°C respectivamente, *lo cual está en línea con lo reportado históricamente* [5]. Al operar a frecuencias muy pequeñas (<1GHz) o a tensiones muy bajas (0,8V), observamos el enorme peso de la potencia estática, que llega a superar el 50%.

Finalmente, el aumento en temperatura dispara el peso de la potencia estática. Al pasar de 45°C a 80°C, para todas las tensiones, a una frecuencia dada, vemos incrementos del 5%-7%. En apartados posteriores entraremos en detalle en más aspectos y anomalías de la potencia estática.

2.4.3. Potencia total vs. frecuencia

Para un primer análisis basta con expresar la potencia total P en sus componentes dinámica y estática (P_d y P_e):

$$P(V_{DD}, F, T) = P_d + P_e = CV_{DD}^2F + V_{DD}I_f(T) \quad (1)$$

Para un programa en ejecución, la potencia total depende de las variables V_{DD} , F y T , a saber, voltaje de alimentación, frecuencia de procesador y temperatura, respectivamente. La potencia dinámica CV_{DD}^2F corresponde a la carga y descarga entre $0V$ y V_{DD} , a frecuencia F , de una capacidad equivalente C . Esta *capacidad equivalente* se puede evaluar en un tiempo muy pequeño o durante toda la ejecución del programa (potencia instantánea o media, respectivamente). En primera aproximación no depende de la temperatura.

La potencia estática depende de la suma de las intensidades de fuga en todos los transistores alimentados, I_f , siendo su componente más importante la intensidad sub-umbral, I_{su} , que aumenta exponencialmente con la temperatura para un transistor aislado. P.e., para un NMOS, es la intensidad drenador-fuente, I_{ds} , cuando la tensión de puerta es cero ($V_{gs} = 0V$) y entre drenador-fuente se coloca la tensión de alimentación ($V_{ds} = V_{DD}$).

Por tanto, si aplicamos una interpolación lineal a las potencias que comparten la misma pareja (V_{DD} , T) obtenemos una recta de la forma:

$$P(F)|_{V_{DD}, T} = P_d + P_e = aF + b \quad (2)$$

Donde a es la pendiente en Watios/GHz y b es el término independiente en Watios. Es decir, aF es la potencia dinámica y b es la potencia estática. En la leyenda de la figura 6 vemos a y b para las 24 rectas.

La calidad de las interpolaciones es muy buena. Es decir, al mantener constantes el voltaje de alimentación y la temperatura, la potencia dinámica se comporta como requiere la teoría, es decir, aumentando linealmente con la frecuencia (Ec. 1 y 2). Recordemos que en *todos* los experimentos de la figura 6 se ha medido el *mismo* IPC, por tanto, en Prime95 aumentar frecuencia del procesador equivale a aumentar potencia y *prestaciones* (IPS, instrucciones por segundo) en la misma medida.

Podemos afirmar que esta linealidad (F , P , IPS) es una particularidad de Prime95 y no se cumple en general, no porque falle la teoría, sino porque el comportamiento de la mayoría de los programas, en combinación con las microarquitecturas actuales lo impiden. Por ejemplo, en programas que fallan en cache y acceden a memoria principal (Mp), al subir en frecuencia los *cores* van a conmutar una capacidad equivalente menor, ya que la Mp, al no escalar

en frecuencia, es mas lenta en términos de ciclo de procesador. Incluso en programas que no acceden a Mp, pero si a la cache compartida de último nivel (L3), la linealidad (F , P , IPS) tampoco se cumple si la cache L3 *no* forma parte del dominio de reloj de L2-L1-CPU. Y esto es así en nuestro procesador Intel de la familia Skylake, dónde L3 y la malla de interconexión forman parte del llamado *uncore*, que está en un dominio de reloj y de tensión diferente[1]. En un Intel Skylake-X, hacer *overclocking* en un programa que accede mucho a L3 no conseguirá un aumento lineal de prestaciones *ni* de potencia dinámica, simplemente porque la latencia de L3 va a aumentar en número de ciclos de procesador.

2.4.4. Potencia total vs. temperatura

Es interesante reorganizar los datos de la figura 6 para visualizar la dependencia entre potencia total y temperatura. En la figura 8 se presenta esta reorganización para las dos frecuencias que cubren el mayor número de temperaturas, 2,2GHz, 2,4GHz y 2,6GHz.

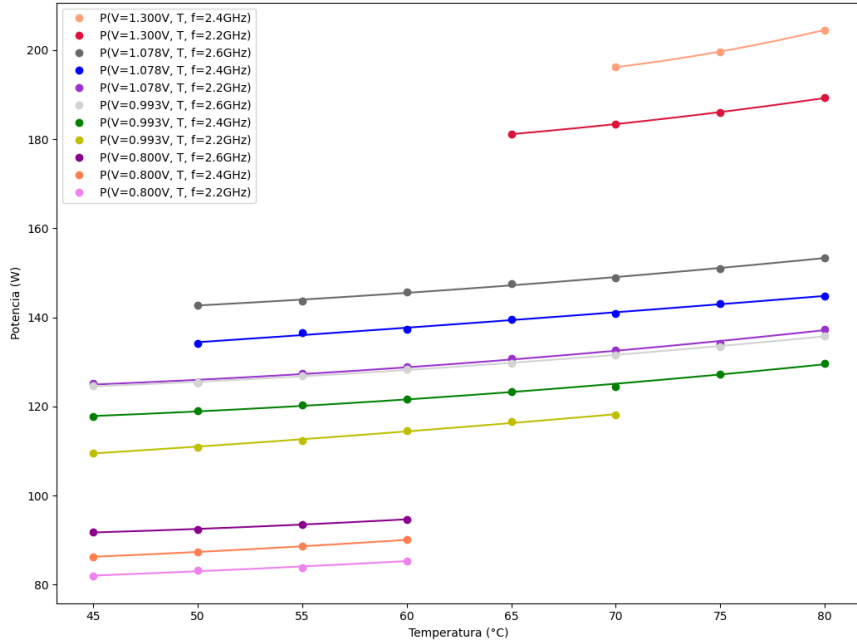


Figura 8: Potencia total vs. temperatura para todas las tensiones a 2,2GHz, 2,4GHz y 2,6GHz. Cada curva de potencia total es la regresión polinomial de grado 2 para una pareja dada (V_{DD} , F).

En principio, y según la Ec. 1, la variación con la temperatura procede únicamente de la potencia estática $V_{DD}I_F(T)$, cuyo aumento es exponencial debido a la disminución de la tensión umbral de los transistores, V_{th} , con la temperatura [5]. La curva esperada sería pues la suma de una constante (potencia dinámica a tensión y frecuencia constante) y de una exponencial de magnitud menor. Suele aproximarse por una función cuadrática y, efectivamente, el ajuste mostrado en la figura 8 es muy bueno, en línea con lo reportado en la literatura [21].

2.4.5. Potencia dinámica vs. temperatura y voltaje

Por lo dicho hasta ahora la potencia dinámica CV_{DD}^2F no depende de la temperatura, sino de dos variables bajo nuestro control (V_{DD} , F) y de una constante C asociada a la interacción programa-microarquitectura. Podemos

calcular esa capacidad C para cada una de las 24 rectas $P(F)|_{V_{DD},T} = aF + b$ (Ec. 2):

$$a = CV_{DD}^2 \rightarrow C(nF) = \frac{a(\frac{W}{GHz})}{V_{DD}(V)} \quad (3)$$

En la tabla 2 se muestran las capacidades equivalentes calculadas para todos los voltajes y temperaturas, así como las medias y desviaciones estándar de tres rangos (T , V_{DD}) coloreados.

		C(T, Vdd) (nF)					
T(°C)	80	36,1	37,6	40,8			
	75	36,2	37,0	39,8			
	70	36,4	36,7	37,4			
	65	36,0	36,5	36,4	Cavg(nF)	σ (nF)	
	60	34,2	35,8	36,2	35,9	0,8	
	55	35,3	35,3	35,7	38,2	1,7	
	50	36,1	35,2	35,3	34,2	0	
	45	35,9	35,6	35,8			
		0,800	0,993	1,078	1,300		
	Vdd(V)						

Tabla 2: Capacidades equivalentes para todas las temperaturas y voltajes. Capacidades medidas y desviación estándar (C_{avg} , σ) para tres rangos (T , V_{DD})

El rango gris selecciona parejas (T , V_{DD}) poco extremas, cercanas una, la otra o las dos a condiciones nominales. En este rango el valor de 35,9nF aproxima muy bien la capacidad. Esto prueba simultáneamente lo que la teoría prescribe: dependencia cuadrática entre tensión y potencia dinámica e independencia de la temperatura.

Pero en regiones más extremas las tendencias cambian.

- Al subir simultáneamente en temperatura y tensión, rango naranja, (T 70°C, $V_{DD} = 1,078V$ o $1,3V$) las capacidades equivalentes aumentan visiblemente hasta una media de 38,2nF, con un máximo de 40,8nF lo cual no es coherente con la teoría y *podría* deberse al incremento por temperatura de la *corriente de cortocircuito*. Se verá en detalle más adelante en el apartado 2.4.7.1.

- Al considerar tensiones pequeñas (0,8V) a elevadas temperaturas relativas ($T = 60^{\circ}\text{C}$) se produce el efecto contrario: una disminución de la capacidad equivalente, lo cual tampoco es coherente con la teoría, pero *podría* ser explicado por la disminución por temperatura de la *corriente de saturación* (I_{on}). Se verá en detalle más adelante en el apartado 2.4.7.2.

2.4.6. Potencia estática vs. temperatura

Si bien en los rangos considerados en el apartado 2.4.1 la potencia total varía con la temperatura de forma cuadrática, y eso es un buen indicador de la dependencia exponencial de la potencia estática con la temperatura, en la figura 9 se muestra todo el espacio experimental, donde vamos a observar desviaciones significativas.

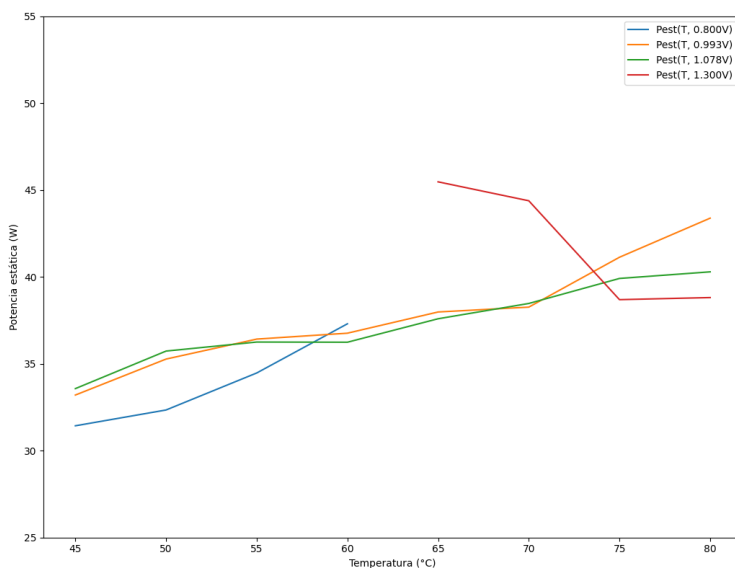


Figura 9: Potencia estática con respecto de la temperatura con voltaje constante

A 0.8V el comportamiento es el esperado, y cerca de la tensión nominal, 0,993V la tendencia también es correcta. Sin embargo, al aumentar la tensión el comportamiento cambia. A 1,078V, en las frecuencias altas se produce una caída significativa, y lo que es peor, a 1,3V la potencia estática disminuye con la frecuencia. Vamos a dedicar el apartado 2.4.7.3 a esta anomalía, que

creemos que puede explicarse por una realimentación no documentada que provocaría una disminución de tensión (o incluso una desconexión) de la memoria cache compartida de último nivel (L3).

2.4.7. Anomalías

A continuación, presentamos posibles explicaciones de las tres anomalías detectadas. Primero se describe el comportamiento anómalo, luego se exponen los aspectos teóricos que pueden contribuir a la explicación. Finalmente, si es posible, se cuantifican las discrepancias y se busca una justificación numérica. Se han ordenado de menos a más arriesgadas.

2.4.7.1. Potencia dinámica vs. temperatura a voltaje elevado

Como se ha dicho, al subir simultáneamente en temperatura y tensión, rango naranja de la tabla 2, ($T = 70^\circ\text{C}$, $V_{DD} = 1,078\text{V}$ o $1,3\text{V}$) las capacidades equivalentes aumentan visiblemente. Puede verse lo mismo directamente en la figura 6 observando como las *pendientes* de las rectas a $1,3\text{V}$ se van haciendo mayores a medida que crece la temperatura. Este fenómeno no puede explicarse por la carga/descarga de capacidad atribuida a la potencia dinámica (P_{sw}), pero si incluimos un término que se desprecia normalmente, debido a las *corrientes de cortocircuito*, los resultados pueden encajar con la teoría.

Las corrientes de cortocircuito se producen en la salida de una puerta CMOS al conmutar de 0 a 1 o de 1 a 0 porque durante un breve instante, en términos del tiempo de ciclo, se produce un cortocircuito entre los transistores P (encargados de subir tensión) y los transistores N (encargados de bajar tensión). Esta corriente de cortocircuito, multiplicada por una tensión variable, menor que V_{DD} , da lugar a una pequeña potencia instantánea. En el transcurrir de los ciclos esta potencia instantánea da lugar a una potencia media, que tiene que aumentar linealmente con la frecuencia (el mismo número de conmutaciones de 0 a 1 o de 1 a 0, pero en menor tiempo). Así pues, podemos formular la potencia dinámica con más exactitud:

$$P_d(V_{DD}, F, T) = P_{sw} + P_{SC} = CV_{DD}^2 F + V_{DD} I_{SC}(T) F \quad (4)$$

Cuyo segundo término es la potencia media de cortocircuito, P_{SC} , que incluye proporcionalidad con F y V_{DD} y con $I_{SC}(T)$, la intensidad media de cortocircuito (en Amperios/Hz) que depende de la temperatura.

La corriente de cortocircuito es muy sensible a la relación $v = V_{TH} / V_{DD}$. Para $v > 0,5$ la corriente no existe porque las redes de subida y bajada de tensión nunca están abiertas a la vez. Para $v = 0,3-0,2$ P_{SC} es típicamente 2%-10% de P_{sw} [5]. Si asumimos $V_{TH} = 0,3\text{V}$:

$$v(1,3V) = \frac{0,3V}{1,3V} = 0,23 \quad (5)$$

Es decir, al operar a una tensión elevada, P_{SC} puede ser relevante. Pero además, al disminuir la tensión umbral con la temperatura:

$$V_{TH}(T) = V_{TH}(T_r) - k_{VT}(T - T_r); T_r = 300K, k_{VT} = [1, 2]mV/K \quad (6)$$

La relación $v(T) = \frac{V_{th}(T)}{V_{DD}}$, aún va a ser menor, y mayor por tanto P_{SC} . En la tabla 3 se presentan los valores v_T para $V_{DD} = 1,3V$ en el rango 65°C-80°C, asumiendo que V_{TH} es 300mV a 300K.

		k_{VT} (mv/°C)			
		1		2	
		V_{TH} (mV)	v	V_{TH} (mV)	v
T (°C)	80	246,9	0,19	193,7	0,15
	75	251,9	0,19	203,7	0,16
	70	256,9	0,20	213,7	0,16
	65	261,9	0,20	223,7	0,17
	26,85	300	0,23	referencia	

Tabla 3: Valores de la relación $v(T)$ para $V_{DD} = 1,3V$ en el rango 65°C-80°C. Asumimos que a 300K (26,85°C) la tensión umbral V_{TH} es 0,3V.

Como puede verse, al aumentar la temperatura la relación v baja desde 0,23 hasta 0,15, entrando de lleno en el rango de corrientes de cortocircuito apreciables. Podemos por tanto calcular el porcentaje de potencia de cortocircuito con respecto a potencia dinámica, asumiendo la capacidad a conmutar calculada en el apartado 2.4.5.

El resultado está en la tabla 4, variando entre el 1% y el 12%. Los valores grandes y crecientes con la temperatura de $v(T)$ a elevadas tensiones explican pues esta primera anomalía, poniendo de acuerdo teoría y práctica al considerar la potencia de cortocircuito. Una observación experimental, por cierto, que no hemos visto reflejado en ninguna publicación que conozcamos.

C= 35,9nF
1,3V

	Pd	Psw	PSC	%PSC(Pd)
80	68,9	60,7	8,2	11,9%
75	67,2	60,7	6,5	9,7%
70	63,2	60,7	2,5	4,0%
65	61,5	60,7	0,8	1,3%
	W/GHz			

Tabla 4: Potencias dinámica (P_D), de conmutación (P_{sw}) y de cortocircuito (P_{SC}); porcentaje de P_{SC} en P_D .

2.4.7.2. Potencia dinámica vs. temperatura a voltaje bajo

Siguiendo el razonamiento del apartado anterior, la capacidad a conmutar es constante para todo nuestro rango de experimentos, ya que en Prime95 medimos un IPC constante para todas las tensiones, temperaturas y frecuencias. Entonces, ¿por qué se aprecia un decremento significativo de potencia dinámica para 0,8V a 60°C?. O, dicho de otra forma, ¿por qué a 0,8V-60°C la capacidad a conmutar baja de 35,9nF a 34,2nF (valor con fondo verde en la tabla 2).

Como puede verse en la figura 6, la calidad de la interpolación en frecuencia es elevada, es decir, el fenómeno de capacidad aparente elevada es *independiente* de la frecuencia. El único sospechoso que queda es la tensión de alimentación: si en vez de ser 0,8V fuese ligeramente más baja, de 0,781V la anomalía quedaría explicada.

Para generar la de tensión de alimentación en cada dominio F/V existe en este chip un regulador de tensión integrado (IVR, Integrated Voltage Regulator), parte en el silicio y parte en la pequeña tarjeta de circuito impreso donde se suelda el i7-7800X[12][7]. Se basa en un reductor corriente continua-corriente continua (CC-CC), con una entrada del regulador de tensión externo de 1,55V-1,8V y una salida “programable” de entre 0,001V y 1,92V. En la generaciones previas Haswell/Broadwell, Intel si dio de detalles de los FIVRs (Fully Integrated Voltage Regulators) explicando que eran reductores conmutados CC-CC (“140 MHz synchronous multiphase buck converter, with up to 16 phases”)[3]. Pero para el micro que nos ocupa no se han dado detalles de su electrónica interna, por lo cual podría seguir la misma filosofía o cambiar completamente, seguir un diseño lineal, más sencillo, pero menos versátil y eficiente [5].

En nuestro contexto, tensión de alimentación muy baja con respecto a la nominal y temperatura relativamente elevada, la hipótesis de una regulación de alimentación “ligeramente” deficiente cobra peso (recordemos, de 0,8V a

0,781V). Ciertamente es que la intensidad en la zona de saturación ($I_{dsat} = I_{ON}$) de los MOS de potencia del regulador, sea del tipo que sea, *puede disminuir con la temperatura* y que eso podría comprometer el valor absoluto de la tensión de salida[5], pero sin más detalles sobre la electrónica es inútil intentar progresar.

Concluimos pues que la explicación más plausible a la reducción de potencia dinámica a bajas tensiones y altas temperaturas -estamos lejos de las condiciones de operación nominales- podría ser simplemente un pequeño error, por defecto, en la regulación de las tensiones de alimentación de los cores.

2.4.7.3. Potencia estática a voltaje elevado

La memoria cache compartida de último nivel (L3, 8,25 MB) forma parte de un dominio de reloj y voltaje independiente en la microarquitectura Skylake que Intel denomina uncore². Este dominio incluye la red de interconexión de tipo malla entre los cores y los bancos de L3 (transporte de bloques de cache y mantenimiento de la coherencia); también incluye la comunicación con Mp. Por ejemplo, en la familia Skylake, y en nuestro procesador, está documentado el escalado de frecuencia del uncore (UFS, Uncore Frequency Scaling)[11]. En nuestro procesador UFS permite acotar la frecuencia desde kernel o BIOS en el margen 0,8GHz- 8,3GHz aunque nosotros no hemos actuado sobre este parámetro, dejando al hardware que tome sus decisiones.

La anomalía descrita en el apartado 2.4.7.3 consiste en una disminución de la potencia estática a tensiones muy altas (1,3V) siempre con temperaturas altas (65°C-80°C), o bien a tensiones medio-altas (1,078V) y temperaturas elevadas (80°C).

Por otra parte, hemos comentado la inactividad de L3 y de Mp en Prime95. En este escenario, es plausible apostar por la existencia un mecanismo de control que entraría en juego en caso de emergencia térmica a elevadas tensiones. Estos mecanismos se describen de forma genérica como “modos de bajo consumo”, y en general se incluyen en la especificación del procesador como estados ACPI visibles/controlables desde el sistema operativo y/o las BIOS[20]. En general se trata de reducir frecuencia y/o tensión de alimentación de los componentes poco utilizados, como en el caso descrito de UFS. Pero en el caso que nos ocupa, reducir frecuencia de L3 tendría poco efecto en la potencia total: al no haber accesos, no se gasta potencia dinámica.

²The portion of the processor comprising the shared LLC cache, IMC (integrated memory controller), HA (home agent), PCU (power control unit), Ubox (System Configuration Controller: reads/writes uncore status/control registers, receives interrupts and dispatches them to cores, etc.), and IIO (integrated IO controller) link interface[7]

Por otra parte, disminuir la tensión de alimentación de L3 sí tendría efectos inmediatos en la potencia estática de los muchísimos transistores que conforman L3. Llegar incluso a la desconexión completa de la alimentación (power gating) cortarían por completo las corrientes de fuga de los bancos desconectados.

Esta hipótesis explicaría el comportamiento experimental visto, pero no hemos encontrado ninguna referencia a la misma. Quizás pudieran diseñarse experimentos adicionales para verificarla, pero creemos que tal esfuerzo ya queda fuera de los objetivos de este trabajo.

2.5. Conclusiones

A lo largo de esta sección se ha realizado un estudio en profundidad de la potencia del procesador i7 7800X con respecto de las variables de temperatura, tensión de alimentación y frecuencia, proponiendo para ello un método experimental para la realización de las pruebas necesarias, basado en el uso de Prime95.

Inicialmente se han aportado resultados referentes a la estabilidad del procesador en diferentes configuraciones de frecuencia y tensión de alimentación y se ha estudiado la relación entre ambas variables en las configuraciones óptimas, la cual se ajusta al modelo teórico esperado, que sugiere una relación lineal.

Posteriormente se han aportado resultados de la potencia consumida con respecto de las variables de temperatura, tensión de alimentación y frecuencia, comenzando desde un punto de vista general y progresando hasta un punto de vista más concreto mediante el desglose de la potencia en estática y dinámica.

Los resultados obtenidos se ajustan correctamente al modelo esperado cuando se miran desde un punto de vista general, pero aparecen ciertas anomalías en algunas configuraciones cuando se analiza desde un punto de vista más concreto.

En el apartado final, se han descrito las anomalías encontradas y se han propuesto posibles explicaciones para cada una de ellas.

Por una parte, se ha razonado el aumento en la potencia dinámica en casos con una temperatura y tensión de alimentación elevadas basándose en el protagonismo que gana la potencia de cortocircuito con respecto del total de potencia dinámica en los casos de temperatura y voltaje elevados.

Por otra parte, se concluye que el decremento de la potencia dinámica en condiciones de tensión de alimentación baja y temperatura relativamente alta podría deberse a una mala regulación de la alimentación, la cual podría ser

ligeramente deficiente al encontrarnos lejos de las condiciones de operación nominales.

Finalmente, se plantea la hipótesis de la existencia de un mecanismo que desconectaría la alimentación para la cache de último nivel, la cual se encuentra en un dominio de voltaje y reloj diferente al procesador, en condiciones extremas con un consumo de potencia notablemente elevado siempre y cuando no se estuviese haciendo uso de dicha cache. De esta manera se podría explicar el decremento de la potencia estática cuando se opera con tensiones de alimentación elevadas.

3. Experimentos sobre la eficiencia energética en SERT Suite

Resumen

En esta sección se busca determinar la configuración óptima en términos de eficiencia energética en los casos más representativos de carga de trabajo en servidores, haciendo uso para ello de la herramienta SERT Suite de SPEC.

Se comienza la sección hablando en profundidad de SERT Suite, comentando las diferentes cargas de trabajo a las que somete a la CPU durante la realización de los tests, así como el método usado para la obtención de puntuaciones y los requisitos necesarios para poder obtener una certificación energética mediante el uso de dicha herramienta.

Finalmente se comentan los resultados obtenidos en SERT Suite con diferentes configuraciones de frecuencia y voltaje, prestando atención a las configuraciones más óptimas para diferentes casos de uso típicos en el ámbito de los servidores.

Además, a la vista de los resultados se propone una puntuación de eficiencia energética con un método alternativo, haciendo uso de Prime95, debido a que con dicha herramienta se somete a la CPU a una carga de trabajo más intensa, resultando en un mayor consumo y mayores temperaturas.

A lo largo de la sección 3.1 se habla en detalle sobre SERT Suite, incluyendo los requisitos para su ejecución, el diseño de los Worklets, el sistema de puntuación utilizado y los requisitos de puntuación necesarios para la obtención de una certificación Energy Star. En la sección 3.2 se comenta la metodología seguida para la ejecución de las pruebas, presentando también las configuraciones a usar. Posteriormente, en la sección 3.3 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas, los cuales se comentarán en detalle a modo de conclusión en la sección 3.4. Finalmente, en la sección 3.5 se plantea otro método para medir la eficiencia energética haciendo uso de Prime95, con la finalidad de obtener una puntuación basada en medidas realizadas con un nivel de carga más intenso y, por tanto, a más temperatura.

3.1. SERT Suite

SERT (Server Efficiency Rating Tool) Suite es una herramienta creada por SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation) con la finalidad de medir la eficiencia energética de un sistema informático mediante la realización de ciertos tests, llamados Worklets, que buscan medir el desempeño

en términos de rendimiento y consumo en la realización de un amplio rango de operaciones comúnmente presentes en el ámbito de los servidores.

SERT es el método usado para determinar si un sistema cumple con los requisitos de eficiencia energética para obtener una certificación de Energy Star 3.0.

3.1.1. Despliegue Hardware

SERT Suite necesita de una determinada configuración Hardware para la realización de las mediciones, tal y como se indica en el manual de usuario[16][15].

Se requiere de un ordenador además del SUT (System Under Test) para que actúe como controlador. Para ello, dicho ordenador se encontrará conectado a:

- Un sensor de temperatura: para poder medir la temperatura ambiente.
- Un analizador de corriente: para medir el consumo del SUT durante la realización de los diferentes test.
- Una tarjeta de red: para la comunicación con el SUT, con la finalidad de enviar las tareas a realizar.

3.1.2. Requisitos Hardware

SPEC redistribuye diferentes configuraciones para la máquina virtual de Java de manera oficial para diferentes combinaciones de SUT[13], los cuales se categorizan en base a:

- Familia del procesador, Sistema operativo y Máquina virtual de Java

Para obtener una certificación Energy Star 3.0 con la suite SERT es obligatorio hacer uso de una de las configuraciones oficiales de acuerdo a los criterios anteriores. En caso contrario, los resultados se marcan como inválidos.

3.1.3. Diseño de los Worklets

SPEC ofrece un documento de diseño de los Worklets[14], donde se explica en detalle el funcionamiento de cada uno de ellos, así como la metodología seguida para el cálculo de las puntuaciones resultantes.

La gran mayoría de los Worklets definidos en SERT Suite se basan en el concepto de transacción, de manera que la métrica utilizada para medir el

rendimiento en un cierto test será el número de transacciones por segundo que ha sido capaz de ejecutar un sistema en un cierto nivel de carga, siendo las únicas excepciones los Worklets que miden el rendimiento y eficiencia energética de la memoria, los cuales tienen una métrica de rendimiento propia, la cual no se basa en el concepto de transacción.

Desde un punto de vista general, los Worklets se pueden agrupar en 3 categorías, atendiendo a los componentes que se estresan en cada uno de los tests:

- CPU, Memoria y Almacenamiento

Diseño de los Worklets: CPU

A continuación se describen desde un punto de vista general las transacciones definidas para cada uno de los Worklets de CPU:

- Compress: compresión y descompresión de un conjunto de datos mediante un método basado en el algoritmo de Lempel-Ziv-Welch.
- CryptoAES: encriptado y desencriptado de datos haciendo uso del algoritmo de cifrado AES o DES.
- LU: descomposición LU de una matriz de números aleatorios con representación en coma flotante mediante el método de pivote parcial.
- SHA256: hashado de un array de datos mediante el uso de SHA256.
- SOR: realización de patrones de acceso típicos sobre los elementos de una matriz de datos representados en coma flotante.
- SORT: reordenación de un vector de enteros de 64 bits.
- SSJ: se trata de un Worklet que incluye el benchmark completo de
- SPECPower. Define varias transacciones, las cuales aparecerán con diferentes frecuencias, con la finalidad de simular la carga de trabajo de los sistemas informáticos de un centro logístico.

Diseño de los Worklets: Memoria

A continuación se describen desde un punto de vista general el funcionamiento de cada uno de los Worklets de Memoria:

- Flood3: basado en la ejecución de 4 tipos de operaciones sobre vectores que son comunes en entornos reales, con la finalidad de determinar el ancho de banda de la memoria.

- Capacity3: basado en el acceso a un set de datos cacheado en memoria, con la finalidad de determinar el tamaño máximo que puede tener dicho set de datos manteniéndose usable.

Diseño de los Worklets: Almacenamiento

A continuación se describen desde un punto de vista general el funcionamiento de cada uno de los Worklets de Almacenamiento:

- Sequential: medición del ancho de banda del disco en operaciones de lectura y escritura secuenciales.
- Random: medición del ancho de banda del disco en operaciones de lectura y escritura aleatorias.

3.1.4. Sincronización

De cara a realizar las mediciones en cada uno de los Worklets el controlador se comunica con el SUT con la finalidad de realizar una calibración, para poder alcanzar los niveles de carga de manera precisa durante las pruebas del Worklet.

Para ello se busca el número de transacciones por segundo que es capaz de ejecutar estando al 100 % de carga. Con la finalidad de que el overhead introducido por la red sea mínimo se envían las transacciones que el SUT debe resolver en paquetes, reduciendo así notablemente el número de mensajes que deben intercambiarse para la comunicación. Sin embargo, debido a la ausencia del código fuente en el paquete redistribuido, no se conocen los detalles de dicho protocolo de comunicación más allá de lo que se explica en la documentación provista por SPEC.

3.1.5. Toma de medidas y cálculo de puntuaciones

SPEC provee un documento oficial con información detallada sobre el procedimiento del cálculo de la puntuación de eficiencia energética a partir de las medidas tomadas en cada uno de los Worklets incluidos en SERT Suite[17].

Para la obtención de una puntuación se realizan medidas en diferentes niveles de carga, los cuales están definidos dependiendo del Worklet a ejecutar, tal y como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5: Niveles de carga por Worklet

Categoría	Worklet	Niveles de Carga
CPU	Compress	100 %, 75 %, 50 %, 25 %
	CryptoAES	100 %, 75 %, 50 %, 25 %
	LU	100 %, 75 %, 50 %, 25 %
	SHA256	100 %, 75 %, 50 %, 25 %
	SOR	100 %, 75 %, 50 %, 25 %
	SORT	100 %, 75 %, 50 %, 25 %
	SSJ	100 %, 87,5 %, 75 %, 62,5 %, 50 %, 37,5 %, 25 %, 12,5 %
Memoria	Flood3	Full, Half
	Capacity3	Max, Base
Almacenamiento	Random	100 %, 50 %
	Sequential	100 %, 50 %
Idle	Idle	Idle

En cada uno de los puntos mencionados anteriormente se realizan medidas de potencia, en Watios, y rendimiento, en transacciones por segundo. A partir de dichos datos se obtiene la puntuación a partir de la tangente formada por la recta que une el punto obtenido con el origen y el eje 'X', tal y como se indica en la figura 10.

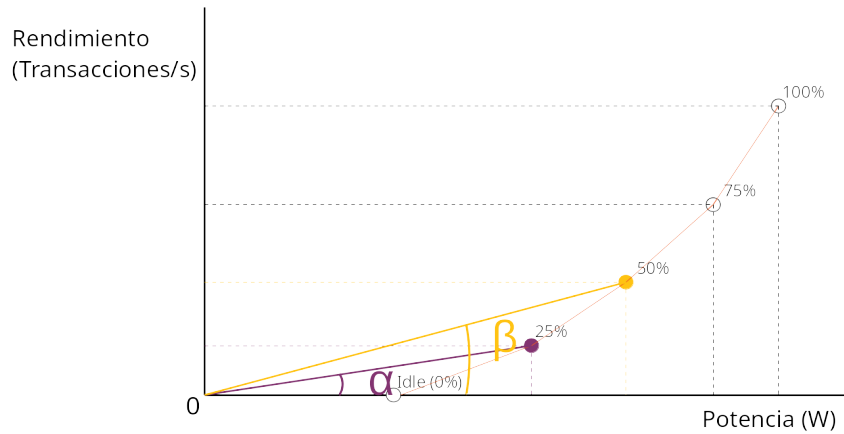


Figura 10: Cálculo de puntuaciones a partir de las medidas

De esta manera:

- Puntuación 25 % = $\tan(\alpha)$; puntuación 50 % = $\tan(\beta)$

Por tanto, las puntuaciones obtenidas se expresan en transacciones/julio.

Finalmente, la puntuación del Worklet se obtiene a partir de la media geométrica de las puntuaciones en los diferentes niveles de carga.

Una vez obtenidas las puntuaciones de todos los Worklets, se calcula la puntuación de cada una de las 3 categorías haciendo una media geométrica de las puntuaciones de cada uno de los Worklets y, finalmente, se realiza una media geométrica ponderada entre las puntuaciones de cada una de las categorías, tal y como se indica en el diagrama de la figura 11.

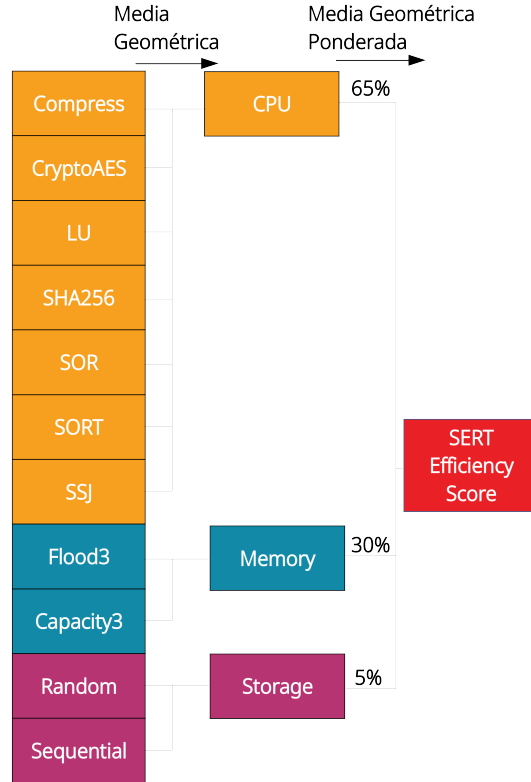


Figura 11: Cálculo de la puntuación final

La puntuación final obtenida consiste en un número, a partir del cual se determina si el SUT cumple con los requisitos para la certificación Energy Star 3.0. Para conseguir la certificación, el valor obtenido debe ser igual o superior a una puntuación mínima determinada por tres factores:

- Formato físico (torre, rack, blade...), número de CPUs y resiliencia.

En la Tabla 6 se presentan las puntuaciones mínimas atendiendo a estos factores.

Tabla 6: Requisitos de puntuación para la Certificación Energy Star

Formato	Número de CPUs	Puntuación Mínima Requerida
Rack	1	11
	2	13
	Más de 2	16
Torre	1	9,4
	2	12
Blade o Servidor Multi-Nodo	1	9
	2	14
	Más de 2	9,6
Servidor Resiliente	1	4,8
	2	5,2
	Más de 2	4,2

3.2. Metodología

Para la realización de las pruebas hacemos uso de un portátil con sistema operativo Gentoo GNU/Linux como controlador y se ha instalado Arch GNU/Linux en el sistema a usar como SUT. La decisión de usar dicho sistema operativo en el SUT viene dada por el número notablemente reducido de procesos en segundo plano que posee, evitando así la aparición de resultados inconsistentes por la ejecución de otros procesos mientras se llevan a cabo las pruebas.

Para la instalación y configuración del SUT hemos hecho uso de la guía de instalación provista por SPEC.

Para las mediciones hemos hecho uso del vatímetro PPA-500 y hemos seleccionado el sensor de temperatura “dummy” en SERT para poder realizar las pruebas sin un sensor de temperatura. Dicha decisión no supone ningún problema ya que SERT únicamente hace uso del sensor de temperatura para determinar si se cumplen las características necesarias para conseguir la certificación y, por tanto, no influye en las puntuaciones obtenidas.

Para determinar la influencia del uso de técnicas de Overclocking y Underclocking en los resultados de eficiencia energética de SERT Suite hemos ejecutado el conjunto completo de Worklets en 4 puntos diferentes de fre-

cuencia:

- 2,5 GHz, 3,0 GHz, 3,5 GHz (frecuencia base de fábrica) y 4,0 GHz.

Para cada uno de los puntos de frecuencia anteriores hemos buscado el valor mínimo de tensión necesario para la configuración sea estable. Dicha estabilidad se ha comprobado desde Windows, haciendo uso de la herramienta Prime95, ya que permite detectar pequeños errores de estabilidad que pasarían desapercibidos con otras herramientas gracias al sistema de comprobación de errores que usa. De esta manera, las configuraciones finales son las siguientes:

- $f = 2,5\text{GHz}$, $V = 0,735\text{V}$
- $f = 3,0\text{GHz}$, $V = 0,818\text{V}$
- $f = 3,5\text{GHz}$, $V = 0,937\text{V}$
- $f = 4,0\text{GHz}$, $V = 1,078\text{V}$

Finalmente, en lo referente a la configuración del sistema de refrigeración, hemos configurado a través de la herramienta AI Suite 3 desde el sistema operativo Windows, donde hemos establecido la configuración estándar para el sistema de refrigeración.

3.3. Resultados

A continuación se muestra la Tabla 7 con los resultados para cada uno de los Worklet, seguidos de un análisis de los mismos. En dicha tabla se incluye.

- Puntuación de rendimiento
- Consumo en Watios
- Puntuación final del Worklet, en referencia a su eficiencia energética

Se marca en **negrita** la puntuación más alta en cada uno de los Worklets.

Cabe destacar que, durante la ejecución de los tests se ha controlado la temperatura en todo momento, haciendo uso de la pantalla presente en la placa base del sistema usado. Gracias a ello hemos podido observar que SERT no mantiene una carga de CPU muy intensa durante un tiempo prolongado, por lo que nos encontramos con temperaturas relativamente bajas, las cuales alcanzan, como máximo, los 58°C en los tests más exigentes en CPU.

Tabla 7: Puntuaciones obtenidas en los tests de SERT por Worklet para cada una de las frecuencias probadas

Categoría	Worklet	Frecuencia	Rendimien- to	Potencia (W)	Puntuación de Eficiencia
CPU	Compress	2,5GHz	1,050	104,731	10,025
		3,0GHz	1,238	111,717	11,085
		3,5GHz	1,405	123,627	11,366
		4,0GHz	1,567	143,110	10,948
	CryptoAES	2,5GHz	1,557	108,797	14,309
		3,0GHz	1,816	117,354	15,478
		3,5GHz	2,011	129,699	15,509
		4,0GHz	2,147	146,554	14,653
	LU	2,5GHz	1,384	106,209	13,028
		3,0GHz	1,687	117,679	14,336
		3,5GHz	1,935	133,559	14,489
		4,0GHz	2,045	159,428	12,824
	SOR	2,5GHz	0,648	96,659	6,704
		3,0GHz	0,772	102,983	7,496
		3,5GHz	0,910	111,833	8,135
		4,0GHz	1,040	128,959	8,067
	Sort	2,5GHz	0,669	99,315	6,738
		3,0GHz	0,804	106,720	7,530
		3,5GHz	0,937	117,728	7,957
		4,0GHz	1,067	137,200	7,776
SHA256	2,5GHz	1,991	98,230	20,271	
	3,0GHz	2,387	104,805	22,775	
	3,5GHz	2,787	115,538	24,119	
	4,0GHz	3,184	132,175	24,092	
SSJ	2,5GHz	0,663	101,353	6,537	
	3,0GHz	0,753	107,101	7,029	
	3,5GHz	0,826	115,714	7,136	
	4,0GHz	0,886	127,888	6,931	
Memoria	Flood3	2,5GHz	2,584	117,974	21,900
		3,0GHz	2,683	124,980	21,466
		3,5GHz	2,691	132,800	20,263
		4,0GHz	2,680	149,117	17,966
	Capacity3	2,5GHz	4,075	120,568	33,802
		3,0GHz	4,827	136,016	35,490
		3,5GHz	5,579	156,906	35,558
		4,0GHz	6,208	192,154	32,307
Almacenam.	Sequential	2,5GHz	8,640	90,560	95,411
		3,0GHz	8,760	90,804	96,472
		3,5GHz	8,783	94,600	92,842
		4,0GHz	8,718	96,541	90,305
	Random	2,5GHz	73,839	90,800	813,199
		3,0GHz	73,005	92,321	790,769
		3,5GHz	72,817	95,131	765,437
		4,0GHz	74,794	98,300	760,876

A continuación se muestran las puntuaciones finales de cada categoría y finales en una tabla comparativa, así como en las figuras 12, 13, 14 y 15 para poder apreciar la comparativa de manera gráfica.

Tabla 8: Puntuaciones obtenidas en los tests de SERT por categoría para cada una de las frecuencias probadas

	2,5GHz	3,0GHz	3,5GHz	4,0GHz
CPU	10,16145	11,20858	11,61124	11,15917
Memoria	27,20779	27,60124	26,84235	24,09206
Almacenamiento	278,54646	276,20113	266,57964	262,12765
Total	16,11	17,24	17,46	16,46

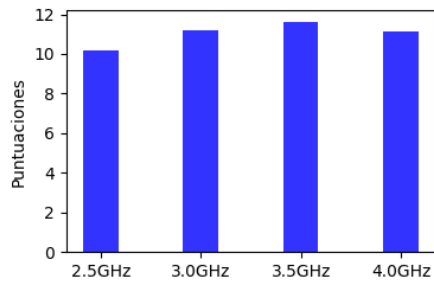


Figura 12: Puntuaciones de la categoría CPU

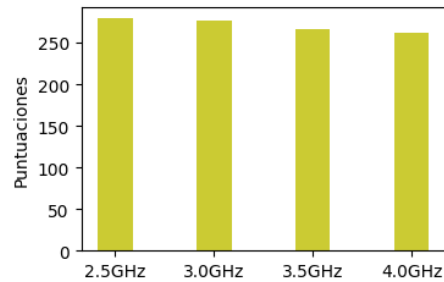


Figura 14: Puntuaciones de la categoría Almacenamiento

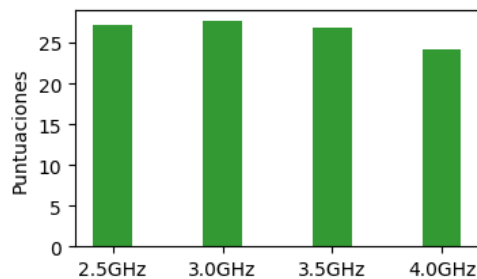


Figura 13: Puntuaciones de la categoría Memoria

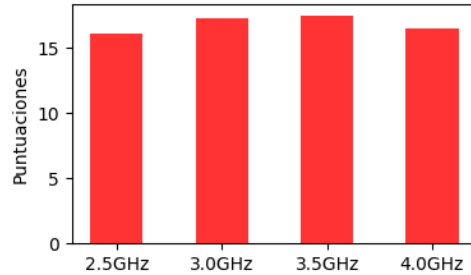


Figura 15: Puntuaciones finales de eficiencia energética

3.4. Eficiencia energética en Prime95

Tal y como se ha comentado en la sección anterior, a la vista de los resultados obtenidos con SERT Suite, se puede apreciar que los tests se ejecutan a temperaturas relativamente bajas y cargas de trabajo notablemente menores que las usadas en el Capítulo 2 con Prime95.

Por ello, hemos decidido buscar otra manera de medir la eficiencia energética con pruebas que exijan la ejecución de conjuntos de operaciones intensas durante un tiempo prolongado, con la finalidad de alcanzar altas temperaturas en las configuraciones de frecuencia y voltaje más altas. De esta manera se conseguirían resultados de eficiencia energética en los que la potencia estática y los casos de uso más intensivos en carga de CPU tendrían una cierta importancia.

Para ello hemos hecho uso de la herramienta Intel VTune Amplifier, para lanzar una instancia de Prime95, mientras se mide el consumo total del equipo haciendo uso del analizador de corriente PPA-500. De esta manera se obtiene como métrica de rendimiento el IPC (Instrucciones Por Ciclo) y como métrica de consumo la potencia total del sistema.

Posteriormente, siguiendo un procedimiento similar al sistema de puntuación de SERT Suite, combinamos ambas métricas y obtenemos una métrica de eficiencia energética, la cual representa las instrucciones ejecutadas por julio.

Para la realización de estas pruebas hemos mantenido las 4 configuraciones de frecuencia y tensión usadas para las pruebas de SERT Suite, así como la configuración del sistema de refrigeración, que se mantiene en el modo estándar de la herramienta AI Suite 3 de ASUS, que sigue la curva de la figura 3.

A continuación, en la tabla 9, se muestran los resultados de potencia (en Watos), rendimiento (en instrucciones por ciclo y millones de instrucciones por segundo) y eficiencia energética (en millones de instrucciones por julio) para las 4 configuraciones de frecuencia y tensión de alimentación.

Tabla 9: Puntuaciones obtenidas en los tests de Prime95 para medir la eficiencia energética

Frecuencia	Potencia(W)	IPC	MIPS	Eficiencia energética
2,5GHz	138,87	1,366	3415	24,59
3,0GHz	162,82	1,364	4092	25,13
3,5GHz	206,64	1,345	4707	22,778
4,0GHz	279,895	1,342	5368	19,178

Durante la ejecución de las pruebas hemos visto una clara diferencia en las temperaturas a las que se encontraba el procesador, llegando a superar los 70°C a 4,0GHz, frente al máximo de 58°C alcanzado durante las pruebas de SERT Suite.

En los resultados obtenidos podemos apreciar una notable variación en las puntuaciones de eficiencia energética, concretamente en la reducción de la eficiencia en los conjuntos con mayor frecuencia y voltaje frente al resto de configuraciones. Ésto ocurre debido a la notable presencia de la potencia estática como consecuencia de las temperaturas alcanzadas a lo largo de la realización de las pruebas.

Por tanto, los resultados son completamente diferentes a los obtenidos en los tests de SERT, obteniendo mediante Prime95 que la configuración óptima para un sistema con una carga donde se estresa la CPU al máximo durante un tiempo prolongado es **3,0GHz**, frente a la configuración de 3,5GHz que se obtiene mediante la aplicación del método SERT.

3.5. Conclusiones

Desde un punto de vista *general*, usando la puntuación final de SERT Suite, se puede apreciar que la frecuencia por defecto, **3,5GHz**, es la que ofrece una mayor puntuación en eficiencia energética y, por tanto, un mejor equilibrio entre rendimiento y consumo. Por lo tanto, para casos de uso típicos donde la carga se encuentre equilibrada entre CPU, memoria y almacenamiento, la configuración para mejor eficiencia energética es utilizar la frecuencia que Intel ha establecido como frecuencia base.

La coincidencia del mejor punto de eficiencia energética en SERT Suite con la frecuencia base de fábrica lleva a pensar que incluso Intel podría estar haciendo uso de dicha herramienta para probar el comportamiento de sus procesadores y que, por tanto, la elección de 3,5GHz como frecuencia base no fuese casual.

Sin embargo, si se observan los resultados desde un punto de vista *más concreto* se llega a la conclusión de que, para casos de uso muy específicos, la configuración por defecto podría no ser la más apropiada.

Por ejemplo, en el caso de los Worklets de *almacenamiento* se puede ver que la frecuencia de reloj no influye en las métricas de rendimiento, ya que el dispositivo de almacenamiento es el limitante en este caso. Por lo tanto en el caso concreto de que el sistema vaya a ser sometido únicamente a una carga de trabajo centrada en el almacenamiento, donde el dispositivo de almacenamiento es el cuello de botella, se puede obtener una mejor eficiencia energética haciendo uso de configuraciones de frecuencia y voltaje menores, ya que suponen un consumo total menor sin impactar al rendimiento.

Por otra parte, un caso bastante curioso es el de los Worklets de *memoria*, debido a que Flood3 no depende del rendimiento de la CPU, mientras que los resultados de Capacity3 sí que se ven influenciados por el mismo, lo cual concuerda con la descripción de los Worklets provista por SPEC en la guía de diseño de SERT[14].

De esta manera, se puede apreciar que en Capacity3 la configuración que resulta en una mejor puntuación de eficiencia es **3,5GHz**, al igual que en los Worklets de CPU, mientras que en Flood3 la mejor puntuación la obtiene la configuración con menor frecuencia y tensión, ya que el rendimiento no se ve influenciado por la velocidad de reloj de la CPU. Por lo tanto, la configuración que obtiene la mejor puntuación en la categoría de memoria es **3,0GHz**, ya que se trata de una configuración intermedia, que ofrece un buen equilibrio entre frecuencia y consumo para ambos Worklets.

Vistos los resultados de este último apartado, de cara a aplicar una configuración en un entorno con una carga de trabajo basada en *memoria*, sería conveniente identificar la influencia del rendimiento de la CPU en el rendi-

miento total del sistema bajo dicha carga para poder elegir correctamente la configuración más apropiada.

Además, cabe destacar que los resultados extraordinariamente altos en los Worklets de *almacenamiento* son el resultado de la utilización de un volumen SSD NVME, que tiene unas características notablemente buenas en lo referente a la velocidad de lectura y escritura y, sobre todo, en la latencia de acceso, lo cual se puede observar claramente en las puntuaciones de rendimiento en el Worklet de acceso aleatorio al dispositivo de almacenamiento.

Por otra parte, se ha podido apreciar que la temperatura del procesador se mantiene durante la mayoría de la ejecución de las pruebas entre 30°C y 50°C, llegando a un máximo de 58°C en las medidas de 100% de carga con la configuración de 4GHz en los Worklets más demandantes de la categoría CPU. Ésto es resultado del hecho de que SERT no mantiene en ningún momento el procesador a un nivel de carga alto durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo para aumentar notablemente su temperatura, como sí se conseguía haciendo uso de Prime95.

A la vista de dichos datos, y vista la importancia de la temperatura en la variación de la potencia estática en el capítulo anterior, se concluye que SERT no da mucha importancia a la potencia estática de cara al cálculo de la puntuación de eficiencia energética.

Es por ello que se ha planteado un método alternativo basado en Prime95 para medir la eficiencia energética bajo condiciones mucho más demandantes en lo referente a la carga de CPU. Mediante la utilización de dicho método sobre el mismo conjunto de datos usado para las pruebas de SERT se obtienen resultados diferentes en la eficiencia energética de las configuraciones planteadas.

Se puede apreciar una notable penalización en 3,5GHz y 4,0GHz debido al gran aumento de consumo medido en dichas configuraciones, bastante mayor que el consumo medido durante la realización de los tests de SERT. De esta manera, se podría concluir que en un caso de uso con una carga intensa y prolongada de CPU la configuración óptima pasaría a ser **3,0GHz**.

4. Conclusiones y trabajo futuro

La realización de este Trabajo Fin de Grado concluye con la obtención de numerosos resultados experimentales de la potencia consumida por el procesador Intel i7 7800X frente a variaciones en la tensión de alimentación, frecuencia y temperatura, así como en lo referente a la eficiencia energética en diferentes configuraciones.

Inicialmente se aporta un método experimental para la toma de medidas de potencia en un procesador, haciendo uso de Prime95, Intel VTune Amplifier y el vatímetro N4L PPA500.

Posteriormente se ha obtenido un diagrama Shmoo con la estabilidad de las diversas configuraciones probadas, obteniendo a partir de dicho diagrama una gráfica que relaciona la frecuencia y el voltaje en las configuraciones óptimas. De esta manera se comprueba que dicha relación se asemeja a una relación lineal, tal y como debería ocurrir siguiendo el modelo teórico.

Por otra parte, al caracterizar la potencia del procesador con respecto a la temperatura, tensión de alimentación y la frecuencia, se obtienen una gran variedad de resultados, los cuales, en su gran mayoría, coinciden con el modelo teórico esperado. Desde un punto de vista general, los resultados son los esperados ya que la potencia aumenta de forma lineal con el aumento de frecuencia y de manera cuadrática con el aumento de temperatura.

Sin embargo, al entrar en la caracterización de la potencia estática y dinámica desde un punto de vista más concreto se puede ver que los resultados no se ajustan a los esperados en ciertas configuraciones. Es por ello que también se aporta una explicación de dicho desajuste con respecto del modelo teórico para cada una de las anomalías encontradas, apareciendo causas no reportadas anteriormente en la literatura experimental que conocemos, como la influencia de la corriente de cortocircuito (potencia dinámica a elevadas tensiones y temperaturas), un pequeño desajuste en la tensión de alimentación interna (potencia dinámica a bajas tensiones y altas temperaturas), o la posible desconexión eléctrica de la cache compartida L3 (potencia estática a elevadas temperaturas).

En cuanto a los resultados de eficiencia, en el caso de la suite SERT, se ha obtenido que la configuración óptima para el uso general en servidores es la que hace uso de la frecuencia base de fábrica, lo cual nos ha llevado a pensar que Intel quizás podría estar haciendo uso de SERT Suite para estudiar sus procesadores y determinar dicha frecuencia en base a los resultados de dicha herramienta. En los Worklets que no se encuentran limitados por la CPU, sin embargo, la configuración óptima es la de menor frecuencia, ya que la pérdida en rendimiento de CPU apenas afecta a los resultados de rendimiento del Worklet pero sí resulta en un decremento notable en el consumo.

Finalmente, proponemos aplicar un método alternativo para medir la eficiencia energética en base en Prime95, obteniendo resultados diferentes a los de SERT. Se trata de medir el consumo total de la plataforma, igual que en SERT, pero tomar como medidas de productividad el marcador IPS, el número de instrucciones ejecutadas por segundo, que en Prime95 es un buen indicador de rendimiento, ya que su IPC es constante con la frecuencia del procesador. Ahora la carga de CPU es mucho más intensa y se prolonga durante un periodo de tiempo mayor, por lo que se alcanzan temperaturas bastante mayores. En este caso la configuración óptima es 3,0GHz, lo cual difiere de los 3,5GHz obtenidos en SERT.

Por lo tanto se puede apreciar que la mejor eficiencia energética de un procesador puede variar notablemente si se consideran cargas de trabajo realmente exigentes, aspecto a considerar, por ejemplo, en la planificación energética de los clústeres más cargados de un centro de datos.

4.1. Trabajos futuros

Todo el trabajo experimental realizado en este TFG se basa en los datos obtenidos para un *único* ejemplar de procesador. Pero es bien sabido que existe una variabilidad de fabricación que resulta en características físicas diferentes entre lotes de fabricación, e incluso entre chips de la misma oblea. Es por ello que comprar y experimentar con más procesadores i7 7800X añadiría certeza a las conclusiones expuestas. En la misma línea de generalización de resultados, pero con mucho más interés, estaría repetir la experimentación con la misma placa base, pero usando la nueva generación de procesadores Cascade Lake-X (p.e. el i9-10900X, finales 2019, 10 cores, también 14nm), esta vez disponiendo desde el principio de al menos dos procesadores físicos, que se probarían por turnos.

La posible desconexión física (*power gating*) o reducción automática de frecuencia del llamado *uncore*, constituido por la cache de último nivel, la interconexión entre cores y la comunicación con memoria principal es otra línea interesante, pero antes de acometerla será necesario formular un programa de experimentación, bucear en los contadores hardware de actividad y prestaciones de Intel y revisar exhaustivamente las opciones al respecto existentes en las BIOS.

Por último, el trabajo agregado de este TFG y el de su predecesor [12] puede merecer una difusión más amplia. Si bien la literatura científica convencional, revistas o congresos, no es muy favorable a este tipo de trabajos, existe una comunidad formada por *overclockers*, estudiantes, científicos e ingenieros muy interesados por este tipo de experiencias, que ponen luz en el, a veces, opaco mundo de los procesadores propietarios. Por ello procede consi-

derar la publicación en blogs con contenidos serios como el citado numerosas veces en este trabajo [21].

5. Anexo I: Comparativa de sistemas de refrigeración

Resumen

En este anexo se narra el proceso de selección de un sistema de refrigeración líquida del procesador para su instalación en la plataforma de experimentación.

Inicialmente se presentan los sistemas de refrigeración disponibles, seguido de una comparativa detallada con la finalidad de escoger el mejor sistema en términos de rendimiento para tener un mejor control y poder hacer uso de un mayor rango de temperatura en las pruebas.

Finalmente se muestran imágenes de cada uno de los sistemas de refrigeración, así como del resultado final una vez instalado el sistema elegido.

5.1. Introducción

Antes de empezar este TFG la refrigeración del procesador era por aire. La figura 16 muestra el modelo usado, un Noctua NH-U9S[9]. Tiene un ventilador regulable que empuja el aire a temperatura ambiente a través de múltiples pasillos de láminas metálicas (2000-4000rpm, hasta 46,5CFM). Tiene un disipador de aluminio de 807cm³ conectado con 5 tubos de calor (heatpipes) al zócalo metálico que está en contacto térmico con el procesador.



Figura 16: Noctua NH-U9S

Pese a la calidad de este ventilador, su capacidad de regulación térmica cargas altas es limitada, como se demostró en el TFG que lo utilizó [12]. Por ello, la primera tarea a realizar fue cambiar a la siguiente gama de refrigeración, llamada en el contexto de los ordenadores de sobremesa *refrigeración líquida*. Disponíamos de dos sistemas de gama alta:

- **Cooler Master Masterliquid ML360R:** se trata de un sistema AIO, *All In One*, por lo que es muy sencillo de instalar y mantener[2].
- **Thermaltake M240:** se trata de un kit para montar un sistema particularizado (*custom*). Requiere más mantenimiento y es más complicado de instalar, pero es mucho más modular, por lo que podría ser ampliado en un futuro[19].

Lo principal a tener en cuenta para las pruebas que se quieren realizar es el rendimiento en la refrigeración de dichos sistemas. Para ello se procede a comparar los radiadores incluidos, ya que es el componente que más influye en lo referente al rendimiento en la refrigeración. También se tendrá en cuenta la capacidad de regulación del sistema para un manejo más preciso de la temperatura.

Las principales características que determinan la capacidad de refrigeración del radiador son su tamaño y las características de los ventiladores que usa.

En ambos casos se puede apreciar que el nombre del modelo del sistema de refrigeración viene dado por la longitud del radiador incluido (en milímetros).

5.2. Comparativa

A continuación se muestra una tabla con las características de los dos sistemas, así como unas imágenes de los diferentes componentes incluidos en los kits.

	Master. ML360R	Thermal. M240
Longitud del radiador	360mm	240mm
Número de ventiladores en el radiador	3	2
Diámetro de los ventiladores	120mm	120mm
Velocidad mínima de los ventiladores	650rpm	800rpm
Velocidad máxima de los ventiladores	2000rpm	1500rpm
Flujo máximo de aire	66,7CFM	40,6CFM
Nivel máximo de ruido	30dBA	26,4dBA
Tipo de bomba	Doble	Simple, tipo D5
Precio de salida	159,99USD	349,99USD



Figura 17: Cooler Master Masterliquid ML360R



Figura 18: Thermaltake M24

5.3. Conclusiones

El sistema Cooler Master tiene unas especificaciones iguales o superiores en todos los aspectos del radiador y sus ventiladores, que es el componente más influyente en el rendimiento de la refrigeración. En cuanto a las bombas de agua, no es posible realizar una comparación directa entre ambos sistemas ya que cuentan con una disposición de bombas diferente, de manera que las especificaciones técnicas no son directamente comparables.

En lo referente a la capacidad de regulación, el sistema de Cooler Master ofrece un mayor rango en la velocidad de los ventiladores del radiador y, en la configuración por defecto, tiene una mayor velocidad máxima y una menor velocidad mínima. El sistema de Thermaltake incluye un modo silencioso que permite rebajar la velocidad mínima hasta 400rpm, lo cual podría permitir un mejor control de la temperatura al hacer uso de frecuencias o voltajes bajos, sin embargo, en este modo también se reduce la velocidad máxima de los ventiladores hasta las 1000rpm, que supondría una gran penalización para la realización de ciertas pruebas.

Por otra parte, el sistema de Thermaltake ofrece ventajas en aspectos como el nivel de ruido de los ventiladores del radiador y la modularidad de cara a ampliar o modificar los componentes. Sin embargo, dichos puntos fuertes no son relevantes para las pruebas a realizar, ya que el principal objetivo es el de obtener el mejor rendimiento del sistema de refrigeración.

Por lo tanto se opta por hacer uso del sistema de Cooler Master, ya que se busca principalmente una mayor capacidad de refrigeración sin importar el ruido generado y no se va a poder aprovechar la gran modularidad del sistema de Thermaltake.

5.4. Resultados del montaje

En las figuras 19 y 20 se muestran fotos del resultado del montaje del sistema de refrigeración elegido con la placa apagada y encendida respectivamente.

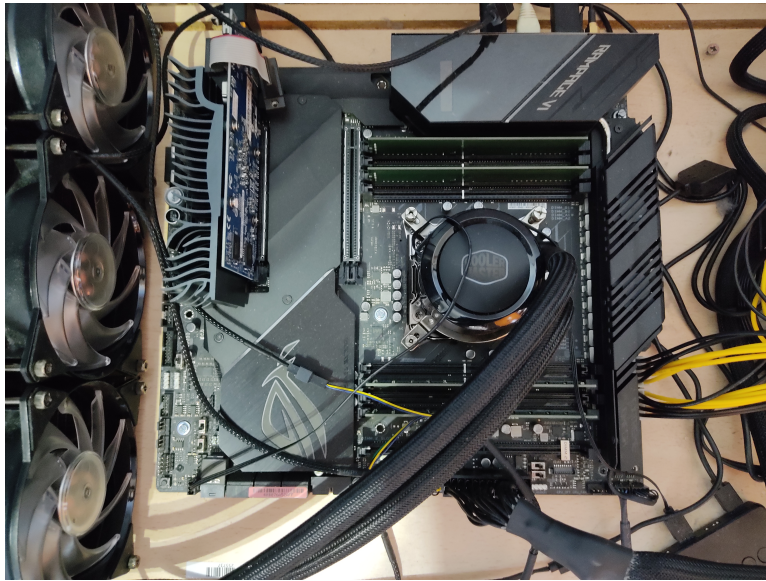


Figura 19: Resultado final con la placa apagada



Figura 20: Resultado final con la placa encendida

Referencias

- [1] Balci, Mete. *A Minimum Complete Tutorial of CPU Power Management, C-states and P-states*. Visitado 16-09-2020. Mar. de 2019. URL: <https://metebalci.com/blog/a-minimum-complete-tutorial-of-cpu-power-management-c-states-and-p-states/>.
- [2] Cooler Master. *MasterLiquid ML360R RGB*. Visitado 19-09-2020. URL: <https://www.coolermaster.com/catalog/coolers/cpu-liquid-coolers/masterliquid-ml360r-rgb/#!>.
- [3] E. A., Burton et al. *FIVR—Fully integrated voltage regulators on 4th generation Intel® Core™ SoCs*. In *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC*. 2014.
- [4] Greenpeace Inc. *Clinking clean: Who is winning the race to build a green internet?* Ene. de 2017.
- [5] H. E. Weste, Neil and Money Harris, David. *CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective*. Fourth Edition, 2011.
- [6] Intel®. *Intel® Core™ i7-7800X X-series Processor*. Visitado 15-09-2020. 2017. URL: <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/123589/intel-core-i7-7800x-x-series-processor-8-25m-cache-up-to-4-00-ghz.html>.
- [7] Intel®. *Intel® Core™ X-series processor family Datasheet, volume 1*. Visitado 15-09-2020. 2020. URL: <https://cdrdrv2.intel.com/v1/dl/getContent/335899>.
- [8] Newtons4th Ltd. *PPA 500/1500 User Manual*. Visitado 18-09-2020. Mar. de 2020. URL: https://d34v9rzb0weal6.cloudfront.net/uploads/2020/03/PPA5xx_15xx-User-Manual-v3.02.pdf.
- [9] Noctua. *NH-U9S*. Visitado 19-09-2020. URL: <https://noctua.at/en/nh-u9s>.
- [10] Official Journal of the European Union. *Commission Regulation (EU)2019/424*. Visitado 27-08-2020. Mar. de 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0424>.
- [11] Schöne, R. and Ilsche, T. and Bielert, M. and Gocht, A. and Hackenberg, D. *Energy efficiency features of the intel skylake-sp processor and their impact on performance*. 2019.
- [12] Sorin Crisan, Marius. *Análisis térmico y de potencia de multiprocesadores con DVFS*. 2019.

- [13] Standard Performance Evaluation Corporation. *Server Efficiency Rating Tool (SERT) Client Configurations*. Visitado 12-08-2020. Jul. de 2020. URL: https://www.spec.org/sert2/SERT-JVM_Options-2.0.html.
- [14] Standard Performance Evaluation Corporation. *Server Efficiency Rating Tool (SERT) Design Document 2.0.3*. Visitado 12-08-2020. Nov. de 2019. URL: <https://www.spec.org/sert2/SERT-designdocument.pdf>.
- [15] Standard Performance Evaluation Corporation. *Server Efficiency Rating Tool (SERT) Run and Reporting Rules*. Visitado 12-08-2020. Nov. de 2019. URL: <https://spec.org/sert2/SERT-runrules.pdf>.
- [16] Standard Performance Evaluation Corporation. *Server Efficiency Rating Tool (SERT) User Guide 2.0.3*. Visitado 12-08-2020. Nov. de 2019. URL: <https://spec.org/sert2/SERT-userguide.pdf>.
- [17] Standard Performance Evaluation Corporation. *The SERT2 Metric and the Impact of Server Configuration*. Visitado 12-08-2020. Nov. de 2019. URL: <https://spec.cs.miami.edu/sert2/SERT-metric.pdf>.
- [18] Standard Performance Evaluation Corporation. *U.S. EPA adopts theSPEC SERT suite*. Visitado 27-08-2020. Dic. de 2018. URL: <https://www.spec.org/sert/epa3-adoption.html>.
- [19] Thermaltake. *Pacific M240 D5 Hard Tube Water Cooling Kit*. Visitado 19-09-2020. URL: https://www.thermaltake.com/C_00003188.htm.
- [20] Wikipedia. *Advanced Configuration and Power Interface*. Visitado 16-09-2020. Ago. de 2020. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Configuration_and_Power_Interface.
- [21] Wong, Henry. *A Comparison of Intel's 32nm and 22nm Core i5 CPUs: Power, Voltage, Temperature, and Frequency*. Visitado 07-08-2020. Oct. de 2012. URL: <https://blog.stuffedcow.net/2012/10/intel32nm-22nm-core-i5-comparison>.