http://journal.unoeste.br/index.php/ca/index
DOI: 10.5747/ce.2019.v11.n2.e270
ISSN on-line 2178-8332

Colloquium Exactarum

Submetido: 02/07/2018 Revisado: 20/02/2019 Aceito: 07/03/2019

ANÁLISE COMPARATIVA DA QUALIDADE DE MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO DE MICROPROCESSADORES

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY OF PROCESSOR COOLING METHODS

Eymar Ferrario de Lima[1]; Maíza da Silva Ozório[2]; Almir Olivette Artero[1]; Francisco Assis da Silva[3], Danillo Roberto Pereira[3]

[1] Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP - Universidade Estadual Paulista
Departamento de Matemática de Computação, Presidente Prudente
eymarlima@gmail.com, almir@fct.unesp.br

[2] Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP - Universidade Estadual Paulista
Departamento de Física, Presidente Prudente
ozoriounesp@gmail.com

[3] Faculdade de Informática de Presidente Prudente, Unoeste - Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente
chico@unoeste.br, danilopereira@unoeste.br

RESUMO – Este trabalho apresenta uma análise comparativa das eficácias de diferentes métodos de refrigeração de processadores utilizados nos dias de hoje. Durante os experimentos, são comparadas as eficácias de alguns casos de testes usando os três principais métodos de refrigeração: refrigeração à ar, refrigeração à água e refrigeração à óleo. Embora os sistemas refrigerados à água sejam apontados como de alta eficácia, os experimentos realizados neste trabalho, usando refrigeração à ar foram os que apresentaram os melhores resultados, de fato, além de ser o método de mais baixo custo de implementação.
Palavras-chave: Métodos de Refrigeração, Microprocessadores, Hardware.

ABSTRACT – This work presents a comparative analysis of the efficiencies of different processor cooling methods used today. During the experiments, the efficacy of some test cases is compared using the three main methods of refrigeration: air cooling, water cooling and oil cooling. Although the water-cooled systems are indicated as high efficiency, the experiments carried out in this work, using air cooling were the ones that presented the best results, in fact, as well as being the least cost method of implementation.
Keywords: Cooling Methods, Microprocessors, Hardware.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia dos microprocessadores evoluiu bastante, desde o primeiro processador Intel 4004, lançado em 1971, que atingia velocidades superiores a 100 KHz com apenas um núcleo e uma quantidade de 2.300 transistores, sendo usado apenas em calculadoras e dispositivos de controle, tinha uma potência de dissipação de apenas um watt. Nos dias mais atuais, é possível encontrar processadores como o i7-7700K, lançado em 2017, que atinge velocidades superiores a 4.2 GHz, com quatro núcleos de processamento, e construído com mais de 1,75 bilhões de transistores, com uma potência acima de 100 watts (INTEL, 2018). Entretanto, por causa das altas velocidades de processamento, em pastilhas de tamanhos muito reduzidos, durante o seu funcionamento, estes dispositivos podem atingir temperaturas muito elevadas, o que pode interferir em suas capacidades de processamento e também pode causar danos irreversíveis a este componente.

Apesar dos processadores atuais possuírem medidas de segurança, para evitar danos ao chip, devido às altas temperaturas, tais como desligar automaticamente, quando o mesmo atinge uma temperatura acima da máxima estipulada pelo fabricante, para o uso contínuo e também para aumentar a vida útil do processador, foram sendo propostos métodos de refrigeração, capazes de atender as necessidades de cada época. Atualmente, existem diversos métodos de refrigeração com diferentes tipos de materiais, que foram sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Os métodos principais são: utilização de dissipadores com ventilação natural e forçada por um ventilador; refrigeração a água utilizando um circuito fechado de bombeamento; refrigeração através da imersão do componente em líquidos que conduzem calor, porém, que não conduzem eletricidade.

2. OBJETIVOS

Apesar da existência de tantas opções de refrigeração, muitas vezes, não se tem informações sobre as verdadeiras eficácias de cada um deles e, o que se vê na prática é o uso de estratégias desenvolvidas pelos próprios usuários, que não possuem conhecimento na área e, que muitas vezes prejudicam mais do que ajudam na refrigeração de seus equipamentos. Um exemplo típico de estratégia questionável é a retirada da tampa dos gabinetes que, muitas vezes interfere nos dutos de ventilação projetados pelo fabricante, causando maior aquecimento em algumas áreas do circuito. Assim, este trabalho apresenta uma análise comparativa dos principais métodos de refrigeração de computadores, utilizando ar, água e até imersão em fluídos, de modo a estabelecer um comparativo entre eles. Durante os experimentos, foram coletados e analisados dados das temperaturas usando os diferentes métodos de refrigeração de processadores e, um comparativo entre eles é apresentado, determinando as técnicas mais eficazes e, também, sugerindo possíveis melhorias. As demais seções deste trabalho estão organizadas da seguinte maneira: Na Seção 3 é apresentada uma revisão bibliográfica da área de termometria, tratando também das estratégias de refrigeração mais usadas; Na Seção 4 é apresentada a metodologia utilizada para a realização das avaliações propostas neste trabalho; Os experimentos realizados e resultados obtidos são apresentados na Seção 4; Uma discussão sobre os resultados obtidos é apresentada na Seção 5 e; Por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

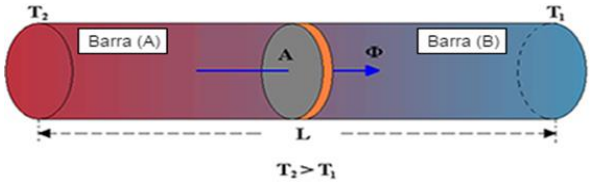
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Lei de Condução Térmica

Na termodinâmica, um dissipador é considerado um reservador de temperatura, que pode absorver uma quantidade razoável de calor sem alterar significativamente a sua própria temperatura, tal absorção é feita pelos princípios físicos de convecção, radiação e condução. Tudo ocorre de acordo com a lei de Fourier sobre condução de calor, que

afirma que “Quando dois corpos são conectados, o corpo de maior temperatura conduz calor para o de menor temperatura até que ambos atinjam temperaturas semelhantes” (YOUNG e FREEDMAN, 2016). Ao realizar os estudos, Joseph Fourier observou que ao encostar duas barras metálicas com temperaturas diferentes, a temperatura varia linearmente por toda a nova barra (união das duas barras), ou seja, de uma extremidade a outra (YOUNG e FREEDMAN, 2016). A seguir pode-se observar a Figura 1 que exemplifica como tal fenômeno ocorre. Nesta figura tem-se duas barras unidas por contato, a barra A se encontra em alta temperatura, enquanto a barra B está em temperatura ambiente.

Figura 1. Exemplo da Lei de Fourier.



Fonte: Adaptado de <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/lei-fourier.htm>.

O fluxo de calor Φ segundo Fourier varia linearmente da barra de maior temperatura *A* até a barra de menor temperatura *B*, e pode ser calculado através da Equação 1.

$$\Phi = \frac{k.A.\Delta t}{L} \qquad (1)$$

Sendo: *k* é a condutividade térmica que consiste em uma constante, que depende do tipo do material utilizado; *A* é a área de contato entre as duas barras e Δ*t* é a diferença de temperatura entre as barras ($\Delta t = t_{final} - t_{inicial}$). Por fim, *L* é o comprimento total das duas barras juntas (YOUNG e FREEDMAN, 2016).

3.2. Máquinas Térmicas e Refrigeradores

Máquinas térmicas são sistemas que realizam a conversão de calor ou energia térmica em trabalho mecânico. Elas funcionam em ciclos que utilizam duas fontes de temperatura diferentes, sendo uma denominada fonte quente que é onde se recebe o calor, e uma nominada fonte fria que é para onde o calor rejeitado é direcionado. Um refrigerador, ao contrário da lei de condução térmica, o calor se transfere da fonte fria para a fonte quente, para promover o caminho inverso, isto é, retirar o calor de uma fonte fria (interior do refrigerador) e entregá-lo para um fonte quente (ambiente) é preciso realizar trabalho forçado.

Pode-se utilizar de exemplo um processador como fonte fria e o ambiente como fonte quente, onde o trabalho realizado pelos métodos de refrigeração busca transferir o calor do processador para o ambiente (YOUNG e FREEDMAN, 2016).

3.2.1 Dissipadores Térmicos

Dissipadores térmicos são ligas metálicas, que podem ser usados para melhorar a condução de calor de um ponto para outro, por exemplo, ajudando a troca de calor de um objeto quente com o ambiente. Em geral, o dissipador é utilizado como anexo, que amplia a superfície do objeto, contribuindo para a troca de calor com o ambiente, desta forma, ajuda a garantir a integridade de componentes eletrônicos que podem ser danificados quando expostos a grandes temperaturas, os mesmos são essenciais para auxiliar componentes de hardware, como microprocessadores, placas de vídeo, fontes e outros componentes eletrônicos, que geram calor constante quando utilizados. Desta forma, esses componentes são fabricados com metais que são excelentes condutores de calor, tais como alumínio e cobre (KAKAÇ, YÜNCHÜ e HIJIKATA, 1993).

3.2.2 Condutividade Térmica de Materiais

A condutividade térmica quantifica a habilidade dos materiais de conduzir energia térmica. Estruturas feitas com materiais de alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente do que estruturas análogas feitas com materiais de baixa condutividade térmica (YOUNG

e FREEDMAN, 2016). A Tabela 1 mostra a condutividade térmica dos principais materiais utilizados nos métodos de refrigeração de processadores e a Tabela 2 mostra a condutividade térmica do óleo de soja em diferentes temperaturas.

Tabela 1. Condutividade Térmica dos Materiais.

Categoria	Material	Condutividade Térmica (W/m K) *
Metais	Cobre	385,0
	Alumínio	205,0
	Aço	50,2
	Ferro	79,5
Fluídos	Ar	0,023
	Água	0,58

Fonte: Adaptado de: <http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm>.

Tabela 2. Condutividade Térmica do Óleo de Soja.

T (ºC)	K (W/m.s) ± σ*
21,0	0,180 ± 0,012
37,5	0,178 ± 0,011
41,5	0,174 ± 0,014
50,0	0,168 ± 0,012
59,8	0,156 ± 0,016
69,5	0,160 ± 0,009

Fonte: Adaptado de: <http://www.scielo.br/pdf/cta/v28n3/a10v28n3.pdf>.

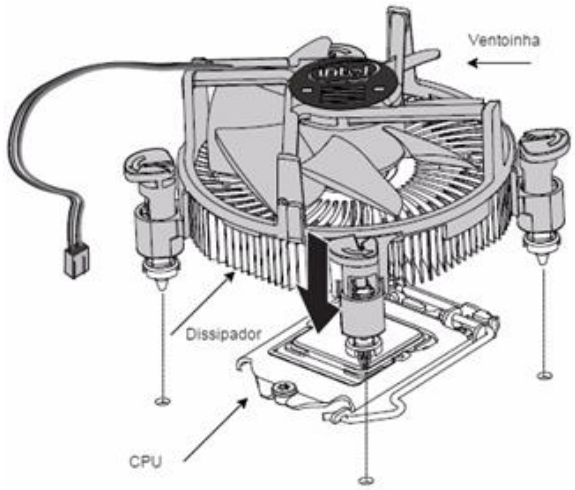
3.3. Estratégias de Dissipação

Todas as estratégias usadas obedecem a Lei de Condução térmica, combinando um dissipador térmico com algum material (ar, água, ou óleo), no intuito de refrigerar o processador.

3.3.1 Refrigeração à Ar

O método mais simples e utilizado na prática é a refrigeração a ar, que consiste basicamente de um dissipador térmico (um bloco de metal, com uma grande superfície), uma ventoinha de tamanho proporcional ao dissipador, sendo ambos conectados ao processador através de uma pasta térmica que é responsável por conduzir o calor da pastilha do processador até o dissipador. Este método é bastante utilizado por ser simples, barato e suficientes na maioria dos casos (CUNHA, 2018). As ventoinhas são pequenos ventiladores que, quando alimentados com energia elétrica, forçam uma corrente de ar. Esta capacidade de gerar uma corrente de ar unidirecional, juntamente com o fato de ser um componente eletrônico barato e com vida útil elevada, tem sido crucial para o seu uso na grande maioria dos sistemas de refrigeração usados na prática (CUNHA, 2018). A Figura mostra como normalmente a refrigeração a ar é estruturada.

Figura 2. Ilustração da conexão convencional de dissipadores.



Fonte: Disponível em <www.intel.com>.

A Figura 3 mostra como o fluxo de ar flui nesse sistema.

Figura 3. Fluxo de ar em dissipadores por ventilação forçada.



Fonte: Disponível em: <https://icesquare.com/wordpress/tag/cpu-fan/>.

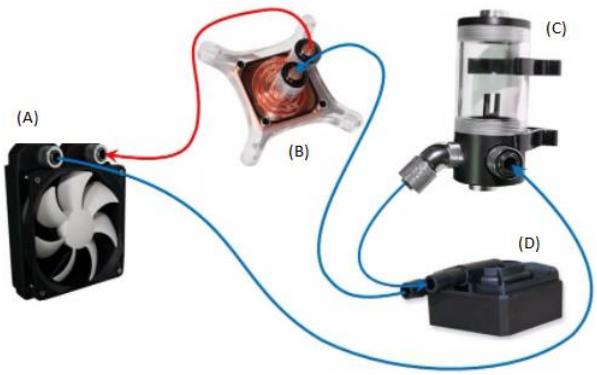
3.3.2 Refrigeração à Água

Este método consiste em dissipar o calor para longe do processador bombeando água através de um sistema fechado, de forma que o líquido não entre em contato direto com os componentes eletrônicos do computador. A água absorve o calor dissipado do processador através do contato com um bloco metálico instalado diretamente no processador, e pôr fim a água perde o calor para o ambiente através de um radiador equipado com ventoinhas (OVASKA, DRAGSETH e HANSSEN, 2016) (WILSON, 2016) (WILSON, 1977). Para implementar tal técnica, existem sete componentes eletrônicos básicos que são:

- Bloco de Água, responsável por fazer o contato direto com o componente eletrônico (processador) que será refrigerado;
- Líquido de Refrigeração, responsável por absorver e conduzir o calor para longe do componente que está sendo resfriado;
- Bomba d'Água, responsável por bombear a água através de todo o sistema de refrigeração;
- Radiador, que dispersa o calor da água pelo ar;
- Ventoinha, responsável por gerar corrente de ar pelo radiador;
- Reservatório de Água, que armazena o líquido extra do sistema;
- Tubulações, que conectam todas as partes do sistema.

A Figura 4 mostra como estes componentes se conectam, formando o sistema de refrigeração.

Figura 4. Modo como os componentes são ligados entre si; (A) radiador junto com a ventoinha; (B) bloco de água; (C) reservatório de água; (D) bomba d'água.



Fonte: Adaptado de <http://water.savestatesociety.net/2013/11/20/how-does-a-water-cooler-work/>.

As setas representam as mangueiras ou tubos de acrílico, que são responsáveis por conectar todos os outros componentes entre si. As setas azuis representam os locais em que a água refrigerada entra, e as vermelhas representam por onde a água quente sai. Nesta Figura, a água dentro do reservatório de água em (C) é bombeada pela bomba d'água em (D), na direção do bloco de água em (B), que está acoplado ao processador a ser resfriado e, é responsável pela troca de calor entre o componente de hardware e a água dentro do bloco, em seguida passa pelo radiador com a ventoinha em (A), responsável pelo resfriamento da água, e pôr fim a água vai do radiador para o reservatório em (C), e assim sucessivamente, formando um ciclo.

3.3.3 Refrigeração à Óleo

A refrigeração por imersão em fluídos consiste em imergir o componente que se deseja resfriar em um recipiente cheio de um

fluído, como algum tipo de óleo, que possui excelente condutibilidade térmica e, no caso de um componente eletrônico, não conduza corrente elétrica, pois isto resultaria em curto circuito e, consequentemente, na queima do componente. Neste sistema, o líquido usado absorve o calor dos componentes através da condução de calor, e o repassa para o ar, através do mesmo princípio. Assim, é necessário que o recipiente utilizado permaneça aberto, para que o óleo tenha uma ampla área de contato com o ar. Alguns utilizadores deste método, tanto para aumentar a eficiência da refrigeração quanto para facilitar a manutenção, utilizam além do recipiente com óleo, bombas de sucção, radiadores com ventoinhas e tubulações para refrigerar o óleo do mesmo jeito que o método citado anteriormente. Desta forma, é possível fechar completamente o recipiente para que o mesmo não tenha um contato direto com o ar, evitando a entrada de impurezas (VERRY, 2012).

O tamanho do recipiente e a quantidade de líquido devem ser adequados para cobrir completamente o objeto a ser resfriado. No caso de um computador é importante ressaltar que não se deve imergir HDs, e quaisquer outros componentes que possuem partes móveis e leitores ópticos, como leitores de CD/DVD e similares, pois os mesmos não vão conseguir operar adequadamente dentro do líquido. Alguns usuários, por questões de segurança, preferem não imergir a fonte do computador junto ao sistema apesar de ser uma prática muito comum (VERRY, 2012). A Figura 5 apresenta um exemplo de computador utilizando este método.

3.4 Trabalhos Relacionados

Como afirmado antes, os sistemas de refrigeração são importantes porque o aumento excessivo da temperatura do processador pode levar ao desligamento das máquinas e, até causar danos mais sérios, assim, ao longo dos anos vários trabalhos têm sido realizados para avaliar o impacto da temperatura na operação dos equipamentos OVASKA, DRAGSETH e HANSSEN (2016) apresentam um trabalho que compara o desempenho e o consumo de energia de sistemas servidores Blade, que foram desenvolvidos para oferecer uma alternativa aos servidores rack tradicionais, de modo a oferecer computação de alta densidade em espaços físicos restritos com consumo de energia reduzido. Neste trabalho indica a necessidade de se realizar os experimentos em locais com temperatura controlada, para que a temperatura ambiente não interfira nas medições.

Figura 5. Refrigeração por imersão utilizando óleo mineral.



Fonte: Disponível em: <https://www. pugetsystems.com/mineral-oil-pc.php>.

BOU-RABEE, SULAIMAN e MAZLAN (2015) trata da melhoria de sistemas de refrigeração de notebooks, objetivando a melhoria do desempenho

LI e KANDLIKAR (2015) apresentam uma visão geral das diferentes tecnologias de condução de calor usadas durante a evolução dos sistemas de refrigeração em grandes centros de processamento de dados.

SMITH (1999) apresenta uma proposta para à medição de temperatura em alta velocidade e com grande precisão, usando sensores de silício, que são muito úteis quando os dispositivos a serem monitorados não possuem sensores internos, como ocorre com as CPUs.

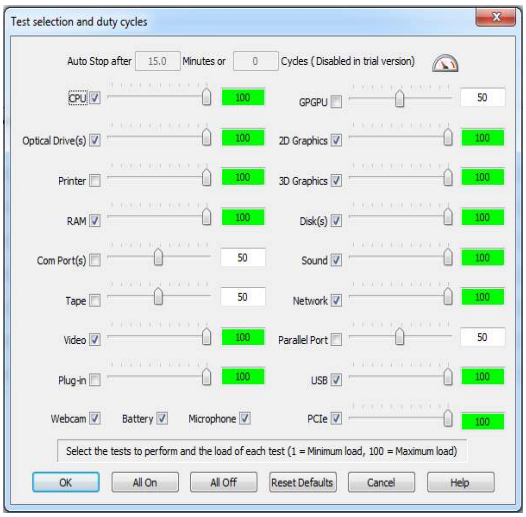
COLES e GREENBERG (2014) apontam uma significativa redução no consumo de energia, diretamente relacionada com a adoção de sistemas de refrigeração mais adequados.

4. METODOLOGIA

Para a execução dos testes de refrigeração foi necessário submeter o processador a um intenso processamento, objetivando gerar o aumento da temperatura e, assim, poderem ser avaliados os diferentes métodos de refrigeração. Para a realização desta tarefa, neste trabalho, é utilizado o software PassMark ® BurnInTest ™, configurado para desempenhar máxima potência em algumas determinadas ferramentas do computador, durante o tempo de uma hora, como pode ser observado na Figura 6. Além disso, utiliza-se em paralelo o software Open Hardware Monitor, para capturar e salvar em um arquivo csv, as temperaturas do processador a cada um segundo de operação.

Neste trabalho, são usados os próprios sensores embutidos nas CPUs, para se obter as medidas de temperaturas, embora, possam ser usados também sensores externos, desenvolvidos especificamente para esta tarefa (SMITH, 1999). A vantagem de se usar estes sensores internos é que as medidas obtidas por eles são exatamente aquelas usadas pelas CPUs para acionar o desligamento automático em caso de aquecimento, além disso, estas medidas podem ser obtidas facilmente, acessando as informações que a CPU disponibiliza.

Figura 6. Configuração dos Testes.



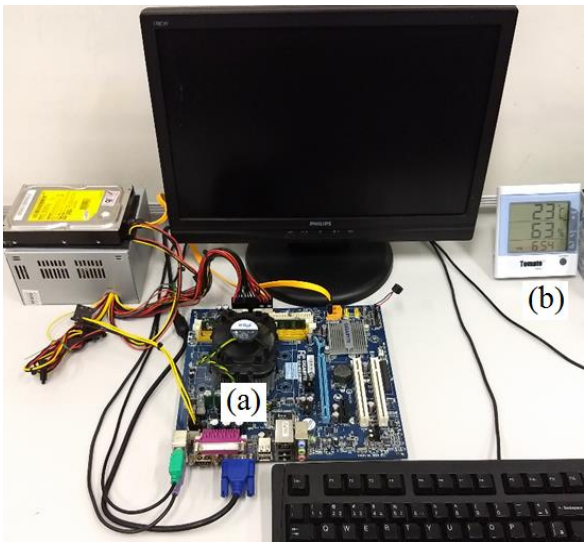
Assim, como proposto em (OVASKA, DRAGSETH e HANSSEN, 2016) e (LI e KANDLIKAR, 2015), para evitar a interferência das condições climáticas, todos os experimentos são realizados em um laboratório fechado, com uma temperatura ambiente variando apenas entre 23 e 24 graus Celsius. Para realizar os experimentos, foram usados dois computadores idênticos, permitindo executar dois experimentos ao mesmo tempo. O hardware utilizado nesses computadores é: Processador AMD Athlom (tm) 64 X2 Dual Core Processor 2.6 GHz; Memória Ram 2,00 GB (1x2); Placa Mãe Gigabyte GA-M61PME-S2; HD Samsung HD161HJ; Fonte de Alimentação Mtek Monterey ATX-500 500W MAX.

5. RESULTADOS

5.1. Refrigeração à Ar

A Figura 7 apresenta a configuração dos experimentos de refrigeração à Ar, onde se observa em (a), a configuração do processador com um dissipador do experimento e em (b) tem-se um termômetro digital para medir a temperatura ambiente.

Figura 7. Configuração dos Experimentos à Ar; (a) dissipador acoplado ao processador; (b) medidor de temperatura ambiente.



Os dissipadores usados no experimento 1 e 2 são descritos nas Figuras 8 e 9 respectivamente. Na Figura 8 tem-se um dissipador quadrado muito usado na prática pois,

vinha junto com os processadores AMD de sua época, sendo composto apenas de alumínio, o mesmo apresentou o segundo melhor resultado desta categoria, atingindo as temperaturas: mínima de 25ºC, média de 47ºC e máxima de 66ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 31ºC de mínima, 49ºC de média e máxima de 66ºC.

Figura 8. Dissipador do Experimento 1.



A Figura 9 mostra um dissipador quadrado muito popular no mercado devido ao se custo benefício, tendo sua estrutura composta por uma malha fina de alumínio entrelaçada com canos de cobre e, dentre os experimento à ar, obteve o melhor resultado, atingindo as temperaturas: mínima de 24ºC, média de 43ºC e máxima de 47ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 30ºC de mínima, 48ºC de média e 53ºC de máxima.

Figura 9. Dissipador do Experimento 2.



Os dissipadores utilizados no experimento 3 e 4 são descritos nas figuras 10 e 11 respectivamente. A Figura 10 mostra um dissipador nos padrões de processadores AMD, o mesmo não apresentou resultados muito satisfatórios, porém conseguiu concluir o teste até o final, o mesmo é composto apenas de alumínio e atingiu as temperaturas: mínima de 27ºC, média de 81ºC e máxima de 90ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 33ºC de mínima, 75ºC de média e máxima de 83ºC.

Figura 10. Dissipador do Experimento 3.



A Figura 11 mostra um dissipador quadrado também nos padrões de processadores AMD, também composto apenas de alumínio e dentre os experimento à ar, se manteve entre os medianos, atingindo as temperaturas: mínima de 26ºC, média de 81ºC e máxima de 91ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 29ºC de mínima, 73ºC de média e 82ºC de máxima.

Figura 11. Dissipador do Experimento 4.



Os dissipadores utilizados no experimento 5 e 6 são descritos nas figuras 12 e 13 respectivamente. A Figura 12 mostra um dissipador quadrado nos padrões de processadores AMD mais moderno, tendo em sua composição um núcleo de cobre envolto de aletas de alumínio, o mesmo apresentou o terceiro melhor resultado nesta categoria, atingindo as temperaturas: mínima de 26ºC, média de 63ºC e máxima de 69ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 32ºC de mínima, 64ºC de média e máxima de 70ºC. A Figura 13 mostra um dissipador quadrado também nos padrões de processadores AMD, dentre os experimento à ar, se manteve entre os medianos, sendo composto apenas de alumínio, atingiu as temperaturas: mínima de

28ºC, média de 89ºC e máxima de 100ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 31ºC de mínima, 82ºC de média e 92ºC de máxima.

Figura 12. Dissipador do Experimento 5.

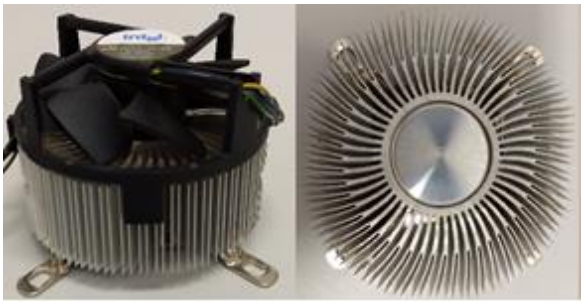


Figura 13. Dissipador do Experimento 6.



Os dissipadores utilizados no experimento 7 e 8 são descritos nas figuras 14 e 15, respectivamente. A Figura 14 mostra um dissipador nos padrões de processadores Intel em formato radial, o mesmo apresentou resultados medianos, porém conseguiu concluir o teste até o final, o mesmo é composto apenas de alumínio e atingiu as temperaturas: mínima de 28ºC, média de 87ºC e máxima de 96ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 31ºC de mínima, 80ºC de média e máxima de 89ºC.

Figura 14. Dissipador do Experimento 7.



A Figura 15 mostra um dissipador também nos padrões de processadores Intel em formato radial, também composto apenas de alumínio e dentre os experimento à ar, obteve o pior resultado, resultando em desligamento do computador durante a realização do experimento, atingindo as temperaturas: mínima de 35ºC, média de 97ºC e máxima de 125ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 38ºC de mínima, 82ºC de média e 104ºC de máxima.

Figura 15. Dissipador do Experimento 8.



O dissipador utilizado no experimento 9 está descrito na Figura 16. Nesse experimento foi usado um dissipador nos padrões de processadores Intel em formato radial, o mesmo apresentou o segundo pior resultado, porém conseguiu concluir o teste até o final, o mesmo é composto por um núcleo de cobre envolto de uma malha de alumínio e atingiu as temperaturas: mínima de 32ºC, média de 98ºC e máxima de 113ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 33ºC de mínima, 88ºC de média e máxima de 101ºC.

Figura 16. Dissipador do Experimento 9.



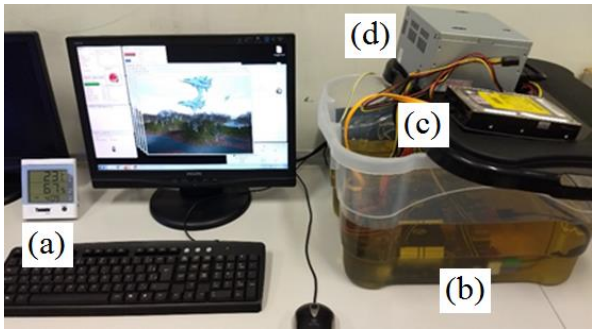
5.2. Refrigeração à Óleo

Para esse método em questão foram utilizados 11,7 Litros de Óleo de Soja em um recipiente de plástico. Todos os componentes eletrônicos do computador foram submersos no óleo com exceção do Disco Rígido e da Fonte de Alimentação. Para auxiliar ainda mais tal método, foi utilizado o dissipador e a ventoinha presentes no caso de teste à ar

1, além de deixar metade do recipiente aberto para facilitar o contato do óleo com o ar ambiente (para auxiliar na troca de calor com o ar).

A Figura 17 apresenta a configuração do experimento de refrigeração a Óleo, onde se observa em (a) um termômetro digital que está responsável por medir a temperatura ambiente, em (b) o recipiente com o computador submerso no Óleo de Soja, em (c) o Disco Rígido e por fim em (d) a Fonte de Alimentação do computador.

Figura 17. Bancada do Experimento à Óleo; (a) termômetro para medir temperatura ambiente; (b) recipiente com o computador submerso em óleo; (c) disco rígido; (d) fonte de alimentação.



Esta categoria de refrigeração só possui um caso de teste devido ao custo de manutenção para realizar testes com diferentes líquidos com viscosidades diferentes. Esse experimento atingiu as seguintes temperaturas: mínima de 26ºC, média de 71ºC e máxima de 96ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 31ºC de mínima, 72ºC de média e máxima de 87ºC.

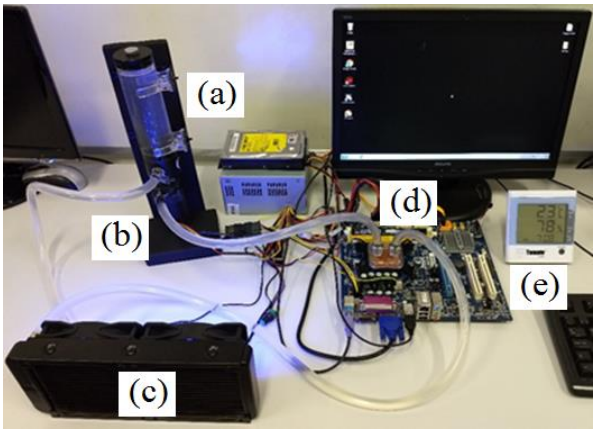
5.3. Refrigeração à Água

Na refrigeração à água, foram propostos dois casos de teste separados, ambos com o mesmo hardware e componentes de refrigeração, porém foram utilizados líquidos diferentes dentro do ciclo do *Water Cooler*. No primeiro caso de teste foi utilizada apenas água Milli-Q sem a adição de nenhuma outra substância, e no segundo caso foi utilizado água destilada juntamente com aditivo de radiador automotivo, respeitando a proporção de 70% água e 30% aditivo.

A Figura 18 apresenta a configuração do experimento de refrigeração à água 1 e 2, onde, observa-se em (a) o reservatório de água com responsável por armazenar toda a água excedente do ciclo, em (b) a bomba d'água responsável por bombear o líquido por todo o sistema, em (c) o radiador equipado com duas ventoinhas e responsável por refrigerar o líquido, em (d) tem-se o bloco de água que realiza a troca de calor entre o processador e o líquido, e por fim em (e) tem-se o termômetro responsável por monitorar a temperatura ambiente. O percurso do líquido obedece a sequência: reservatório, bomba d'água, bloco de água, radiador, e repete sucessivamente, sendo todos os componentes são interligados utilizando mangueiras transparentes de borracha.

Esta categoria de refrigeração possui dois experimentos. Sendo os resultados do experimento 1: mínima de 28ºC, média de 106ºC e máxima de 129ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 29ºC de mínima, 81ºC de média e máxima de 101ºC; e do experimento 2: mínima de 28ºC, média de 106ºC e máxima de 127ºC no núcleo 1, enquanto no núcleo 2 apresentou 30ºC de mínima, 84ºC de média e máxima de 101ºC.

Figura 18. Bancada dos Experimentos utilizando Refrigeração à Água; (a) reservatório de água; (b) bomba d'água; (c) radiador com ventoinha; (d) bloco de água; (e) termômetro para medir a temperatura ambiente.



6. DISCUSSÃO

6.1. Refrigeração à Ar

Neste trabalho foram realizados nove testes utilizando diferentes tipos de dissipadores que podem ser encontrados no mercado, a Tabela 3 mostra os resultados dos diferentes testes em relação as temperaturas máximas, médias e mínimas dos dois núcleos do processador.

Tabela 3. Resultados dos Experimentos à Ar.

Número do Experimento	Núcleo 1 (Mínima) ºC	Núcleo 1 (Média) ºC	Núcleo 1 (Máxima) ºC	Núcleo 2 (Mínima) ºC	Núcleo 2 (Média) ºC	Núcleo 2 (Máxima) ºC
1	25	47	66	31	49	66
2	24	43	47	30	48	53
3	27	81	90	33	75	83
4	26	81	91	29	73	82
5	26	63	69	32	64	70
6	28	89	100	31	82	92
7	28	87	9	31	80	89
8	35	97	125	38	82	104
9	32	98	113	33	88	101

Como citado anteriormente, todos os testes foram realizados no mesmo ambiente, com temperatura ambiente variando entre 23 e 24ºC. O processador utilizando possui um mecanismo de proteção que força o desligamento da máquina caso o mesmo atinja uma temperatura superior a 125ºC, alguns casos de teste resultaram em desligamento antes do tempo final do teste.

A Tabela 4 mostra o material de composição do dissipador, e a tensão aplicada nas ventoinhas 5V (velocidade = 2.000 rpm) ou 12V (velocidade = 5.000 rpm).

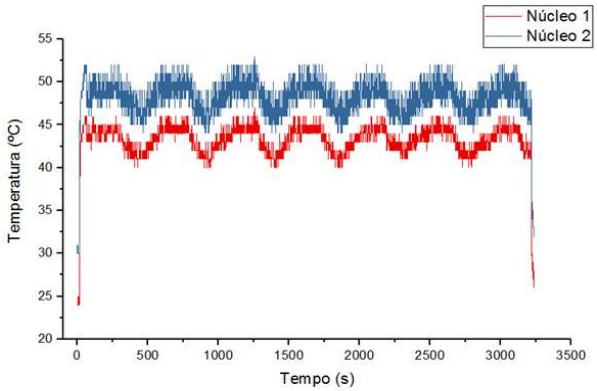
Pode-se observar nas Figuras 8 à 16 que existem duas derivações geométricas de dissipadores, sendo algumas em formato quadrado e outras radiais e, ao se analisar as temperaturas, observa-se que os dissipadores que possuem o formato quadrado (experimentos de número 1 a 6), obtiveram os melhores resultados em relação a temperatura média, enquanto que os dissipadores radiais (experimentos de número 7 a 9) apresentaram os piores resultados.

Tabela 4. Material dos dissipadores e tensões /velocidades das ventoinhas nos Experimentos.

N# do Experimento	Composição do Dissipador	Tensão/Velocidade na Ventoinha
1	Alumínio	12V/5.000 rpm
2	Cobre e Alumínio	12V/5.000 rpm
3	Alumínio	12V/5.000 rpm
4	Alumínio	12V/5.000 rpm
5	Cobre e Alumínio	12V/5.000 rpm
6	Alumínio	5V/2.000 rpm
7	Alumínio	12V/5.000 rpm
8	Alumínio	12V/5.000 rpm
9	Cobre e Alumínio	12V/5.000 rpm

Para comparação com os demais testes de refrigeração, A Figura 19 apresenta um gráfico do teste com melhor desempenho desta categoria (experimento 2), para ilustrar o comportamento da temperatura do processador ao longo dos 3600 segundos de teste.

Figura 19. Gráfico do experimento 2 (Melhor Resultado).

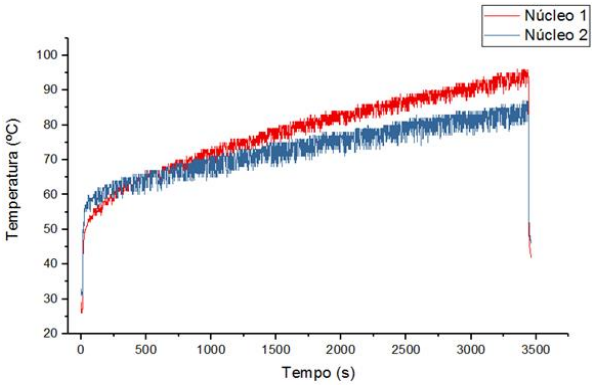


Pode-se observar que o quando iniciamos o teste, o crescimento de temperatura acontece rapidamente, e se estabiliza poucos segundos após o começo e, ao final do teste, a temperatura diminui drasticamente também.

6.2. Refrigeração à Óleo

O óleo de soja perde sua capacidade de condutividade térmica conforme é aquecido e, por mais que o recipiente tenha uma área de contato relativamente grande do óleo com o ar, o óleo absorve muito mais calor do processador do que o mesmo consegue perder para o ar. A devido a esse fenômeno, o método de refrigeração à óleo realizado neste trabalho, perde a sua eficiência de refrigeração ao longo do teste (conforme o óleo vai esquentando). A Figura 20 mostra um gráfico do comportamento da temperatura do processador em relação ao tempo e, diferente do melhor caso de teste à ar, este método possui um gráfico que no início apresenta um crescimento rápido, porém não estabiliza a sua temperatura após um tempo, a mesma continua crescendo devagar até o final do teste. Assim como o melhor teste de ar, o comportamento do gráfico após o termino do teste também apresenta uma queda brusca, porém a temperatura ainda mantém-se relativamente elevada, uma vez que a temperatura do óleo ainda se encontra alta.

Figura 20. Gráfico do Resultado do Experimento a Óleo.



Levando em consideração o comportamento do gráfico e o tempo do teste realizado, possivelmente o computador desligaria se o teste continuasse por mais tempo, uma vez que o crescimento de temperatura se manteve constante.

5.3. Refrigeração à Água

A bibliografia sugere que tal método apresenta resultados melhores que os métodos apresentados anteriormente, porém os dois experimentos realizados neste trabalho apresentaram resultados bem inferiores aos demais casos de teste. Ambos apresentaram desligamento por excesso de temperatura durante o teste. A Tabela 5 apresenta os resultados dos dois experimentos realizados.

Tabela 5. Resultados dos Experimentos do Método de Dissipação à Água.

Número do Experimento	Núcleo 1 (Mínima) ºC	Núcleo 1 (Média) ºC	Núcleo 1 (Máxima) ºC	Núcleo 2 (Mínima) ºC	Núcleo 2 (Média) ºC	Núcleo 2 (Máxima) ºC
1	28	106	129	29	81	101
2	28	106	127	30	84	101

As Figuras 21 e 22 apresentam um gráfico das medições de temperatura dos experimentos 1 e 2 respectivamente

Figura 21. Resultado do Experimento 1.

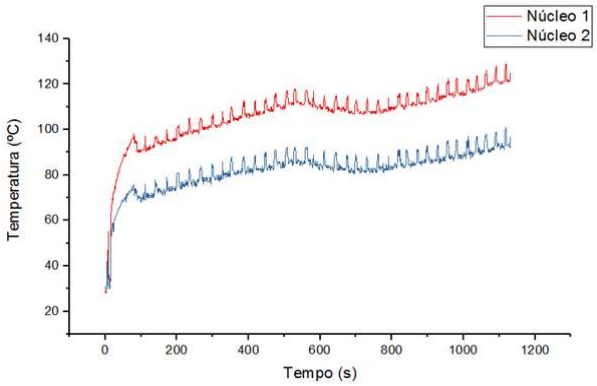
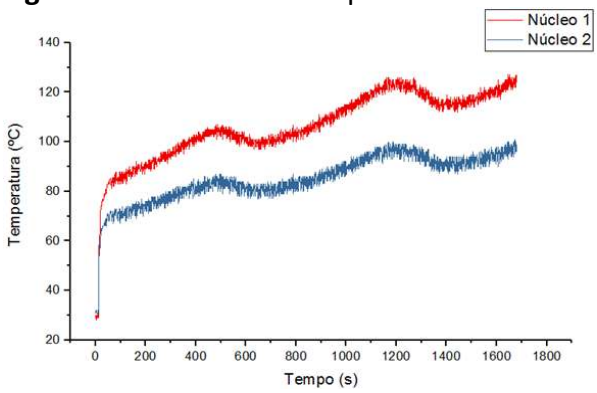


Figura 22. Resultado do Experimento 2.



7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de existirem diversos métodos de refrigeração, este estudo mostra que a grande maioria deles deriva dos três métodos descritos neste trabalho e, todos se valem da lei de dissipação de calor de Joseph Fourier. Embora as implementações possam ter diferentes aspectos estéticos, os componentes usados são basicamente os mesmos, podendo haver variações apenas na disposição dos mesmos e nos materiais usados.

Através dos resultados obtidos pode-se observar que a refrigeração a ar obteve os melhores resultados, enquanto que os experimentos utilizando refrigeração à água obtiveram os piores resultados. É preciso levar em consideração que a refrigeração à água usada nos microprocessadores consiste em uma adaptação de dispositivos, produzidos por alguns fabricantes, para se acoplar o chip ao bloco de água (Fig. 18 (d)). Enquanto que em sistemas de grande porte, projetados para a refrigeração à água, grandes superfícies de contato do processador ficam em contato com um grande fluxo de água, produzindo resultados muito melhores (TAYLOR e SOLBREKKEN, 2008).

Em trabalhos futuros deverão ser explorados outros métodos e tipos de dispositivos como radiadores de diferentes formatos, uso de aditivo na água, como usado em radiadores de automóveis. Além de avaliar métodos alternativos na refrigeração à óleo, por exemplo, utilizando óleos com viscosidades e condutividade térmica diferentes, assim como acoplar uma bomba d'agua ao recipiente de óleo, bombeando o mesmo para um radiador e o devolvendo para o recipiente, realizando uma refrigeração forçada no óleo.

REFERÊNCIAS

BOU-RABEE, M. A., SULAIMAN, S. A., MAZLAN, W. M. S. W. Enhanced Cooling of Laptop Computer for Improvement of Processing Performance. **Global Journal of Computer Science and Tech-**

nology: H Information & Technology, v.. 15, n. 5(1), 2015.

COLES, H.; GREENBERG, S., **Direct liquid cooling for electronic equipment**, Technical Report LBNL-6641E, Berkeley, CA, Disponível em: http://eetd.lbl.gov/sites/all/ files/direct_ liquid_cooling.pdf, 2014, Acesso em: 21 jun. 2018. https://doi.org/10.2172/1134242

CUNHA, D. O., **Seminário sobre Dissipadores**. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/~doc/dissipadores.pdf. Acesso em: 11 maio 2018.

INTEL CORPORATION. 2018. Disponível em: www.intel.com. Acesso em: 28 jul. 2018.

LI, Z. ; KANDLIKAR, S. G. Current status and future trends in data-center cooling technologies. **Heat Transfer Engineering**, v. 36, p. 523–538, 2015. https://doi.org/10.1080/01457632.2014.939032

KAKAÇ, S.; YÜNCÜ, H.; HIJIKATA, K. **Cooling of Electronic Systems**. Nato Science Series E, Vol. 258, Dordrecht Springer Netherlands, pp. 97–115, 1993. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1090-7

OVASKA, S. J.; DRAGSETH, R. E.; HANSSEN, S. A. **Impact of retrofitted CPU water cooling on supercomputer performance and power consumption**. Proceedings of SoutheastCon 2016, Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/document/7506669/?anchor=authors, 2016. Acesso em: 18 abr. 2018. https://doi.org/10.1109/SECON.2016.7506669

SMITH, M. Measuring Temperature on Computer Chips with Speed and Accuracy. **Analog Devices**, v. 33-4, pp. 1-5, 1999.

TAYLOR, R.A.; SOLBREKKEN, G. Comprehensive system-level optimization of thermoelectric devices for electronic cooling applications. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 31, p. 23-31, 2008. https://doi.org/10.1109/TCAPT.2007.906333

VERRY, T. **Oil cooling: Deep fried, or deep energy savings?** Disponível em: https://www.extremetech.com/extreme/124197-cooling-computer-servers-with-oil/2. 2012. Acesso em: 21 abr. 2018.

WILSON, T. V. **How Liquid-cooled PCs Work**. (2006). HowStuffWorks.com. Disponível em: https://computer.howstuffworks.com/liquid-cooled-pc. htm 2019. Acesso em: 22 abr. 2018. https://doi.org/10.1145/1499402.1499464

WILSON E. A. **True Liquid cooling of computers**, em AFIPS '77 Proceedings of the June 13-16, National Computer Conference, pp. 341-348, 1977.

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **Física II Termodinâmica e Ondas**. 14. ed. , São Paulo: Pearson, 2016.