
ANÁLISIS CFD APLICADO EN EL DISEÑO DE SALAS DE RADIO

♦ R E S U M E N ♦

La sala de radio de un buque militar es un espacio crítico donde la gestión térmica incide directamente en la confiabilidad de los sistemas electrónicos. En este trabajo se realizó un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) del sistema de ventilación, evaluando el comportamiento del flujo de aire en términos de velocidad y temperatura en una sala real. Con base a los resultados obtenidos se proponen mejoras basadas en los principios de aire acondicionado de precisión y metodologías de diseño de centros de datos.

Palabras clave: CFD, HVAC, aire, precisión.

APPLYING CFD ANALYSIS TO RADIO ROOM DESIGN

♦ A B S T R A C T ♦

In naval warships, radio rooms are essential hubs where effective thermal management is vital for the reliability of electronic equipment. This paper presents a Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of a ship's ventilation system, assessing airflow velocity and temperature in a real-world setting. Based on the findings, improvements are proposed utilizing precision air conditioning principles and modern data center design methodologies.

Keywords: CFD, HVAC, air, accuracy.



LUIS OVALLE LEYTON

Capitán de corbeta
MBA in Maritime Technology Management at Australian
Maritime College
(lovalle449@gmail.com)
Valparaíso, Chile.

Durante el diseño de un buque, se desarrollan estudios de distintos niveles de profundidad, pero se definen 3 etapas de ingeniería: conceptual, Básica y de Detalle. En la Ing. Básica se definen parámetros de operación en base a los requerimientos del usuario final y se especifican los equipos a instalar, con el objetivo de estimar con un cierto nivel de certeza los costos de construcción del buque.

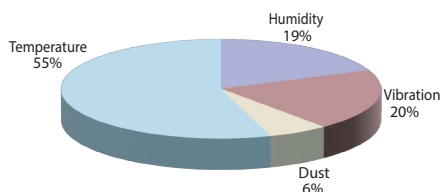
La sala de radio de un buque militar es un espacio en donde se gestionan todas las comunicaciones tanto internas como externas para el desarrollo normal de las operaciones. En esta sala se alojan una diversidad de equipos electrónicos, como servidores, computadoras, redes y equipos de comunicaciones. Para lograr

un funcionamiento óptimo de estos sistemas es necesario aplicar el concepto de aire acondicionado de precisión. Esto implica lograr un flujo de aire adecuado en términos de temperatura y velocidad que permita disipar el calor generado producto del funcionamiento de los equipos.

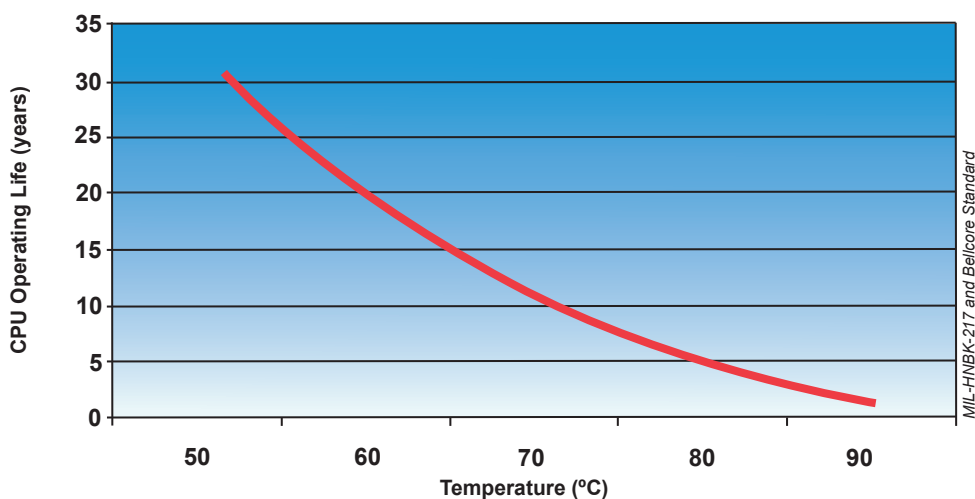
Un factor crítico en la confiabilidad de un sistema electrónico es la temperatura de operación. Estudios demuestran que más del 50% de las fallas en equipos electrónicos son por condiciones térmicas inadecuadas (CHATSWORTH PRODUCTS, INC., 2004). Operar de manera prolongada fuera de los rangos de temperatura recomendados por el fabricante puede tener un impacto negativo e importante en la disponibilidad operativa del equipo. Este impacto se puede ver reflejado en una disminución en el tiempo medio entre fallas (MTBF), aumentando la necesidad de mantenimiento correctiva y sus respectivos costos de ciclo de vida (EATON, 2016).

Una buena gestión térmica puede incrementar el rendimiento de un procesador en un 2% por cada 10 °C de reducción en la temperatura de trabajo. A pesar de que esto parece marginal en un solo equipo, no lo es tanto, en recintos con decenas o centenas de servidores. A modo de ejemplo, en un data center

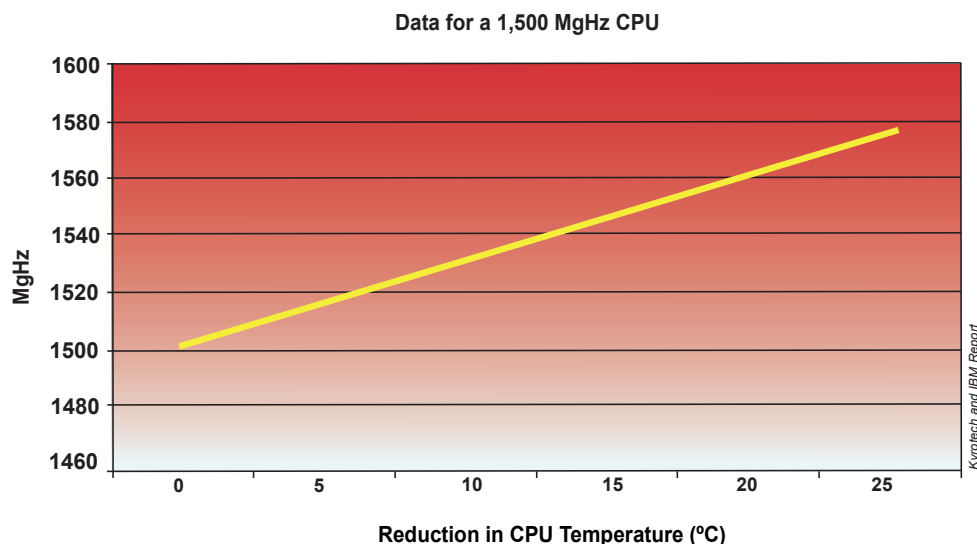
Electronic Failure Sources



Principales fuentes de falla en equipos electrónicos.
(Fuente: Chatsworth Products, Inc., 2004)



Relación entre vida útil del CPU y temperatura.
(Fuente: Chatsworth Products, Inc., 2004)



Variación de la velocidad del procesador en función de la reducción de temperatura.
(Fuente: Chatsworth Products, Inc., 2004)

una disminución de 10 °C puede evitar la necesidad de agregar un servidor 2U cada cinco gabinetes (EATON, 2016).

La ASHRAE, en su publicación *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* (ASHRAE, 2015), establece un rango de temperaturas recomendado para la operación de equipos electrónicos de clase A1 a A4, el cual varía entre los 18 °C y 27 °C. Este rango recomendado puede expandirse en equipos A2, A3 y A4 hasta los 45 °C, pero con un potencial impacto en el desempeño térmico del equipo que puede derivar en problemas de fallas no planificadas, disminuyendo el MTBF.

Metodologías de diseño de centro de datos

El aire acondicionado de precisión está conceptualizado para mantener condiciones ambientales estables y controladas en espacios con cargas térmicas densas, como salas técnicas y centros de datos. Un deficiente desempeño térmico del aire acondicionado tiene incidencias negativas en la confiabilidad y el rendimiento de equipos electrónicos.

A diferencia del aire acondicionado tradicional, que persigue el confort humano, el aire acondicionado de precisión busca regular con precisión temperatura, humedad y flujo de aire al interior de la sala. En este sentido el sobrecalentamiento de los equipos electrónicos es algo casi prohibitivo y mantener patrones de circulación de aire correctos es mandatorio.

El desarrollo de un proyecto de construcción naval y en especial un buque de características militares es un desafío en términos de integración, debido a la poca disponibilidad de espacios. Además, la cantidad de equipos de distintos proveedores que deben ser integrados en espacios reducidos genera interferencias y requiere de soluciones avanzadas.

El diseño térmico de salas técnicas se estima inicialmente en términos de balances globales, sin considerar el comportamiento del flujo de aire en el espacio. El aire acondicionado de precisión no solo requiere un buen balance térmico, también debe asegurar un flujo de aire constante en un rango de temperatura especificada en los equipos en donde se produce la transferencia de calor por convección.

La integración de un sistema de aire acondicionado de precisión en una sala técnica requiere como condición base una detallada definición de los equipos electrónicos a utilizar. Por lo anterior, un flujo de trabajo ideal debiera considerar que el sistema electrónico a enfriar se encuentre definido y cerrado en términos de ingeniería, previo a iniciar el diseño de la ventilación en la sala. De esta forma se evita la posibilidad de subestimar los requerimientos de enfriamiento, lo cual va a arrastrar problemas a futuro en el proceso de implementación de la sala.

Uno de los conceptos clave en el enfriamiento de equipos electrónicos es el gradiente térmico. Este gradiente representa la diferencia de temperatura entre el aire que ingresa al rack o servidor y la temperatura superficial del componente interno que genera calor. La temperatura de entrada al rack es el único parámetro que puede manejar el integrador y es vital mantener el aire a frío en el punto de ingreso con un caudal y temperatura estables.

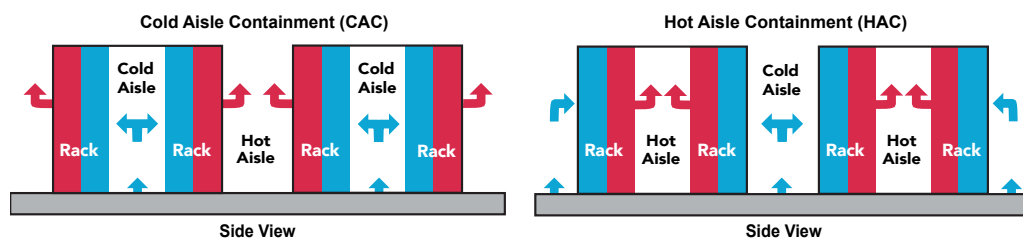
Para mantener un buen gradiente térmico y flujo de aire constante existen estrategias de diseño específicas que actualmente se aplican en el desarrollo de centros de datos. Un concepto clave que se aplica es la segregación de flujos de trabajo, es decir, separar físicamente el aire caliente del aire frío. Esto se logra mediante la aplicación del concepto "Cold Aisle Containment" (CAC) y "Hot Aisle Containment" (HAC). En el primero básicamente se encapsula el ingreso de aire frío al rack, asegurando que este llegue a la admisión a una temperatura y velocidad acorde y que además provenga de una fuente única y estable. En el segundo lo que se hace es

cerrar y ductear el aire caliente, para evitar que se mezcle con el aire de la sala y de esa forma redirigirlo para su recuperación térmica o expulsión controlada.

Ambos enfoques de diseño tienen el objetivo de evitar el fenómeno de recirculación térmica, el cual implica que el aire caliente descargado vuelve a ser absorbido por los equipos, lo cual afecta negativamente el gradiente térmico de trabajo. En el estudio (Schneider Electric, 2017), se indica que el uso del concepto de aislamiento de flujos de aire puede mejorar la eficiencia térmica de la sala hasta en un 40 %.

En buques, aplicar el concepto de segregación de flujos de trabajo podría ser una forma de optimizar el aire acondicionado en salas técnicas. Esto debe respetar las restricciones propias de la construcción naval, es decir poco espacio disponible y geometrías restringidas. Aplicando conceptos de HAC es posible asegurar un gradiente térmico adecuado en los racks, cumplir con las temperaturas normadas por ASHRAE y mejorar la eficiencia del sistema de ventilación, sin necesidad de sobredimensionar el sistema de enfriamiento.

Tradicionalmente el aire acondicionado en salas técnicas navales se estima utilizando métodos empíricos y cálculos manuales. Es decir, en base a estándares se definen velocidades y caudales de alimentación que permiten cumplir las renovaciones de aire requeridas para la sala. Para la definición térmica se balancea calor a disipar con capacidad de enfriamiento de los equipos dispuestos para esto. Este método puede ser útil en etapas tempranas del proyecto ya que permite hacer estimaciones iniciales. Pero en



Cold Aisle Containment (CAC) y Hot Aisle Containment (HAC).
(Fuente: Vertiv Co., 2017)

etapas avanzadas de ingeniería, deja fuera consideraciones, como la separación y direccionamiento del flujo de aire y el gradiente térmico ideal que permita una operación costo eficiente de los sistemas electrónicos. Hay que considerar que estos sistemas son de tecnología muy avanzada y de alto costo, por lo que cumplir de buena forma los requerimientos de aire de precisión es mandatorio.

Uso de herramientas CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una técnica que utiliza simulaciones numéricas para representar fenómenos físicos, como el movimiento y la temperatura del aire en un espacio cerrado. A través de un modelo virtual que representa la física del problema que se quiere estudiar es posible reproducir la circulación del flujo de aire, la distribución térmica y para este caso la interacción entre fuentes disipadoras y emisoras de calor.

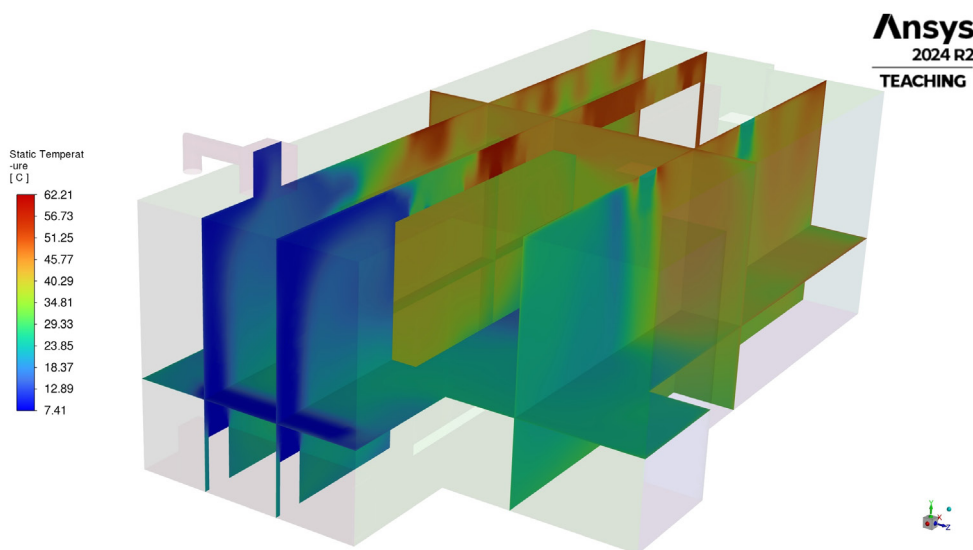
Con CFD se pueden hacer estimaciones bastante certeras de propiedades como la velocidad y la temperatura del aire, y de esa forma complementar los cálculos iniciales de balance térmico y flujo de aire. Mediante este modelo virtual se

pueden tomar decisiones más informadas sobre la disposición de equipos, la ubicación de entradas y salidas de aire o el direccionamiento de los flujos, además de la detección de problemas como recirculaciones, zonas de calor acumulado o pérdidas de eficiencia en la ventilación, que pueden comprometer la confiabilidad de los equipos electrónicos.

Incorporar CFD en etapas tempranas de diseño permite evaluar distintos escenarios de disposición de equipos sin recurrir a prototipos físicos. De este modo, es posible seleccionar la configuración más termo-fluido eficiente de manera metódica, evitando modificaciones costosas en fases avanzadas de construcción. Así, se logra una integración más eficiente y de menor costo, que favorece la operación óptima de la futura sala de radio.

Integración fluida dinámica de una sala de radio de un buque militar

Objeto poder evidenciar las ventajas de ocupar modelos CFD en el diseño de una sala de radio de un buque militar, se



Campo de magnitud de temperatura.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

efectuó un levantamiento de datos reales y se modeló el espacio en un software CAD/CAE. El objetivo fue hacer un proceso de optimización del aire acondicionado de precisión en la sala desde una situación base definida inicialmente.

Para la modelación de la sala y el análisis termo-fluido desarrollado, se consideraron la velocidad y la temperatura del aire como parámetros de observación. La simulación se realizó en el software ANSYS, que permite generar la geometría del modelo y posteriormente discretizarla, transformándola en un volumen de control sobre el cual se resuelven las ecuaciones de flujo y energía.

La sala modelada considera ventilación forzada y extracción natural, en base a los caudales y temperaturas definidos para el proyecto. El espacio incluye nueve racks y una unidad de enfriamiento. Para representar la emisión de calor en los racks, se calculó el gradiente térmico de cada uno según la potencia disipada. De manera análoga, se estimó el gradiente térmico de la unidad de enfriamiento en función de su capacidad máxima de operación.

Se realizó un análisis cualitativo de la velocidad del aire en la sala. En promedio, esta se estabilizó en valores menores a los de ingreso, reflejando la pérdida de energía cinética por interacción con el ambiente. La velocidad se mantuvo relativamente uniforme en la mayor parte del volumen de control, con máximos localizados en

los ingresos y salidas de aire de los racks y unidad de enfriamiento, lo que corresponde al patrón esperado de flujo. Con estos resultados se estimó que el caudal de aire definido para la sala es adecuado.

Antes de analizar los resultados de temperatura, es importante señalar que los datos levantados de la sala evidenciaban un desbalance térmico entre las fuentes emisoras (racks) y las disipadoras (unidad de enfriamiento). En consecuencia, las cargas térmicas no coinciden y para efectos de la simulación nunca se podría alcanzar la estabilización.

El campo de temperatura muestra gradientes térmicos importantes, generando zonas frías con temperaturas inferiores en las cercanías de la unidad de enfriamiento y zonas calientes con temperaturas mayores en los racks más alejados de la unidad de enfriamiento. Este comportamiento cualitativo es coincidente con el desbalance térmico de la sala de radio.

El monitor de temperatura promedio de la sala presenta un valor creciente que no se estabiliza. Esto no es un error de la simulación, sino que representa el desbalance térmico mencionado anteriormente. El valor de temperatura promedio de la sala de 33 °C e incumple la normativa ASHRAE de 27 °C.

A través de la visualización volumétrica de líneas de corriente de temperatura,

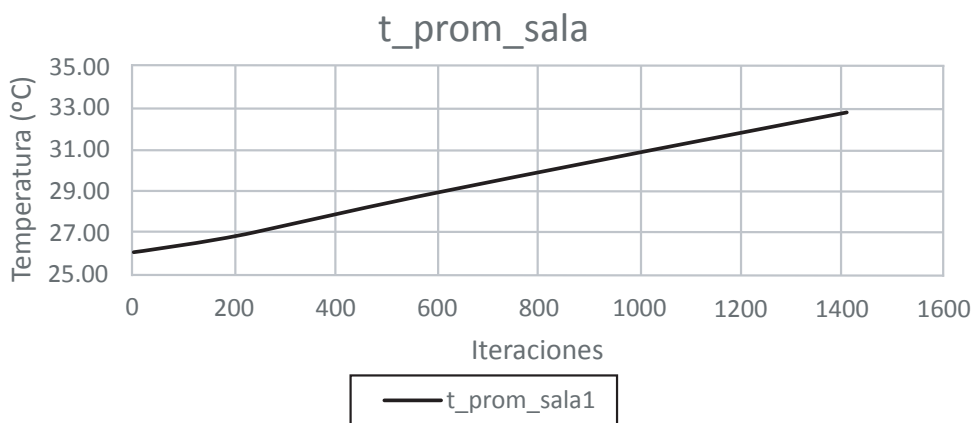
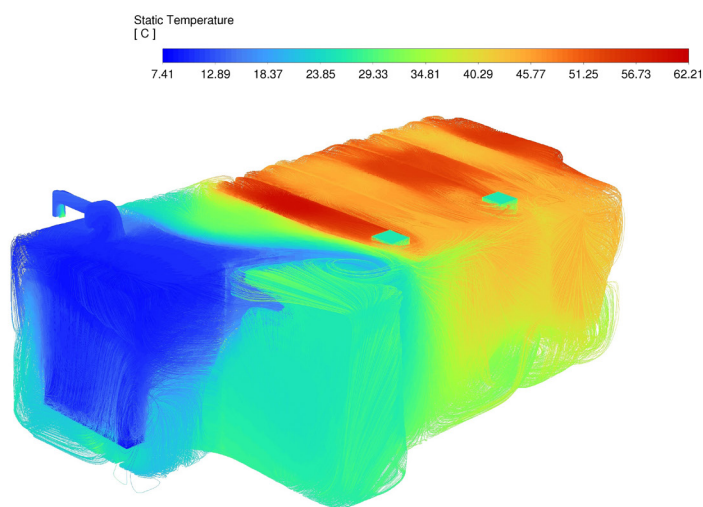


Gráfico 1: Monitor de temperatura promedio en la sala.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

se aprecian recirculaciones de aire frío y caliente. En las cercanías de la unidad de enfriamiento, el aire frío tiende a recircular e incluso a escapar por la ventilación natural. En cambio, en las zonas más alejadas se generan recirculaciones de aire caliente y sectores con temperaturas elevadas. Esta distribución evidencia una mezcla deficiente del aire, lo que impide un desempeño óptimo de la unidad de enfriamiento.

En el gráfico 2 se hizo una comparativa entre las temperaturas de ingreso a los racks más alejados de la unidad de enfriamiento y los más cercanos a esta. Las diferencias de temperaturas son importantes y están en el orden de los 10 °C. Este resultado confirma la distribución desigual de enfriamiento en la sala y evidencia la necesidad de efectuar cambios al diseño.



Visualización volumétrica de líneas de corriente de temperatura.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

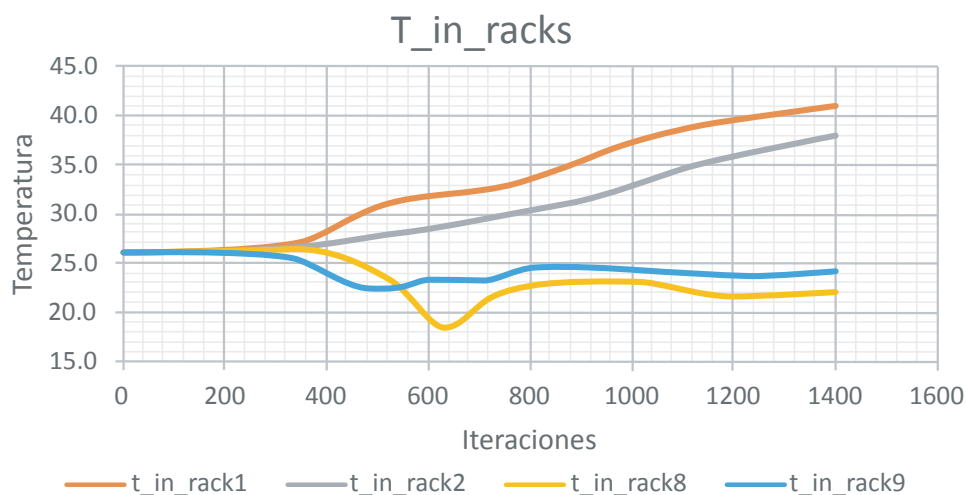


Gráfico 2: Temperaturas de entrada a los racks 1, 2, 8 y 9.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

Con el propósito de poder optimizar el manejo de aire al interior de la sala se efectuó un proceso de implementación de mejoras en base a metodologías de diseño de centro de datos. Para esto se aplicó una configuración HAC modificada a la salida de aire de los racks, ducteándolos directamente hacia el exterior. También se posicionó la FCU frente al ingreso de aire de los racks y se modificó el sentido de flujo de aire para que descargue de la forma más directa posible hacia los ingresos de los racks.

Para esta configuración se evaluaron dos escenarios, diferenciados por la distancia de la unidad de enfriamiento respecto a los racks (Caso 1 y Caso 2). El objetivo era determinar si esta variación afectaba la temperatura de ingreso a los racks; sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre ambos escenarios. (Ver tabla)

El análisis cualitativo de los nuevos campos de temperatura muestra que, al aplicar una configuración HAC y segregar el flujo de aire caliente, se logran mejoras significativas en las temperaturas globales de la sala. A ello se suma el reposicionamiento de la unidad de enfriamiento y el cambio en el sentido del flujo, medidas que contribuyen

a optimizar el gradiente de temperatura en el ingreso a los racks y, en consecuencia, a aumentar la eficiencia de enfriamiento de la unidad.

Haciendo una comparación entre el caso base, correspondiente al arreglo inicial de la sala, con los escenarios Caso 1 y Caso 2, donde se implementaron mejoras en la climatización, la tabla siguiente muestra cómo el desempeño térmico de la sala mejora de forma significativa: la temperatura promedio disminuye y se alcanzan los valores establecidos por la normativa ASHRAE (27 °C, Ver gráfico 2). Asimismo, las temperaturas de ingreso a los racks —parámetro crítico para garantizar la confiabilidad de los equipos electrónicos— se redujeron de manera importante en ambos casos, confirmando la efectividad de las medidas aplicadas. (Ver Tabla)

Una nueva interpretación volumétrica de la distribución térmica y de los patrones de circulación de aire evidencia cambios relevantes con la nueva configuración. En primer lugar, la reubicación de la unidad de enfriamiento permite una distribución más uniforme de la temperatura, eliminando las zonas de recirculación de aire frío y caliente. Además, la configuración HAC confina el aire caliente en la descarga,

	Caso base	Caso 1	Caso 2	Caso base-Caso 1	Caso base-Caso 2
t_prom_sala1-op (°C)	31.6	26.9	26.8	15%	15%
vel_prom_sala-op (m/s)	0.2	0.4	0.4	51%	52%
t_in_rack1-op (°C)	32.3	27.9	28.0	14%	13%
t_in_rack2-op (°C)	39.7	26.8	26.9	32%	32%
t_in_rack3-op (°C)	38.1	26.0	26.1	32%	32%
t_in_rack4-op (°C)	36.4	25.5	25.2	30%	31%
t_in_rack5-op (°C)	34.9	24.1	23.6	31%	32%
t_in_rack6-op (°C)	34.1	10.8	12.9	68%	62%
t_in_rack7-op (°C)	33.6	8.0	8.6	76%	74%
t_in_rack8-op (°C)	21.4	9.2	10.4	57%	51%
t_in_rack9-op (°C)	23.6	20.8	21.5	12%	9%

Tabla comparativa Caso base, Caso 1 y Caso 2.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

facilitando su expulsión controlada fuera de la sala. Finalmente, se reduce de manera significativa la pérdida de aire frío por la ventilación natural.

Analizando el monitor de temperatura en la sala previo a la optimización (Gráfico 1) y comparándolo con el monitor post optimización, se puede apreciar claramente la estabilización de la temperatura en 26,9°C. Esto, se logra a pesar de que se mantiene el desbalance térmico, lo que refuerza el impacto positivo sobre esta propiedad, producido por la aplicación de las recomendaciones

La implementación de los cambios propuestos, basados en la filosofía de diseño HAC, el reposicionamiento de la unidad de enfriamiento y la modificación del sentido de su flujo, presentó mejoras significativas en la distribución térmica de la sala. Esto demuestra que, sin aumentar la capacidad de la unidad de enfriamiento y aplicando metodologías de diseño de centros de datos, fue posible optimizar la disipación de calor sobre los racks.

Conclusiones

El diseño térmico de salas técnicas navales, particularmente en espacios críticos como la sala de radio, requiere un enfoque más allá de los balances térmicos tradicionales. Con el análisis efectuado se puede ver que integrar metodologías de diseño de

centros de datos, como la segregación de fluidos, permite mejorar de manera significativa la eficiencia en el control de temperatura, evitando recirculaciones que comprometen la confiabilidad de los equipos.

Incorporar herramientas de CFD en etapas tempranas del desarrollo de la ingeniería ofrece un soporte cualitativo y cuantitativo al proceso de toma de decisiones de diseño. Con una simulación de estas características se puede visualizar el comportamiento del aire acondicionado, identificando zonas de recirculación y estancamiento, además de visualizaciones bastante intuitivas respecto a las posibles temperaturas de trabajo en los racks. También es posible evaluar distintos arreglos de los equipos al interior de la sala lo que permite optimizar el enfriamiento en la sala.

Adoptar este enfoque integral en el diseño de una sala de radio con equipos electrónicos puede contribuir a aumentar la disponibilidad operativa de los equipos electrónicos, reducir el riesgo de fallas asociadas a estrés térmico y disminuir los costos de ciclo de vida al optimizar la capacidad instalada de enfriamiento. En definitiva, aplicar conceptos de diseño térmico propios de la industria de centros de datos en el ámbito naval representa una oportunidad concreta de elevar los estándares de confiabilidad y eficiencia en la integración de sistemas electrónicos a bordo de buques militares.



LISTA DE REFERENCIAS

1. ASHRAE. (2015). *Thermal guidelines for data processing environments* (4th ed.). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Technical Committee 9.9.
2. Chatsworth Products, Inc. (2004). *Best practices & concepts for computer room cooling* (White Paper No. MKT-60020-233 Rev. 2). Chatsworth Products, Inc.
3. https://cdn2.hubspot.net/hub/54495/file-17636344-pdf/docs/best_practices_cooling_wp.pdf
4. Department of Defense. (1995). MIL-HDBK-217F: Reliability prediction of electronic equipment (Notice 2). U.S. Department of Defense.
5. https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=215560
6. Eaton Corporation. (2016). *Driving data center efficiency through best practices*. Eaton Corporation.
7. <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/data-center/Driving-DC-efficiency-through-best-practices.pdf>