



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL
AIRE DENTRO DE UN CUARTO DE CÓMPUTO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

DE JESÚS PÉREZ OMAR



DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARTÍN SALINAS VÁZQUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO 2014

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	I
Objetivos	I
Motivación	I
1. Estado del arte	1
1.1. Diseño bioclimático	1
1.1.1. Confort	1
1.1.2. La inercia térmica y el aislamiento	2
1.1.3. Ventilación	2
1.1.4. Convección	3
1.1.5. Necesidad de climatización	4
1.2. Energía eléctrica	4
1.2.1. Consecuencias del consumo de combustibles de origen fósil	5
1.2.2. Cambio climático	5
1.3. Sistema de aire acondicionado	7
1.3.1. Aire acondicionado de confort y de precisión	7
1.4. Centros de procesamiento de datos	8
1.4.1. Sistemas de enfriamiento	9
1.4.2. Técnicas para el enfriamiento de los cuartos de cómputo	9
2. Ecuaciones de gobierno	11
2.1. Ecuaciones de Navier Stokes	12
2.2. Simulación de Grandes Escalas	13
2.3. Esquema numérico	16

3. Configuración inicial	17
3.1. Condiciones iniciales y de frontera	19
3.1.1. Consideraciones	20
3.2. Validación de la simulación	20
3.2.1. Causas del sobrecalentamiento	22
4. Propuestas de solución	25
4.1. Primer propuesta:	25
4.2. Propuesta 2:	26
4.3. Propuesta 3:	26
4.4. Propuesta 4:	27
4.5. Propuesta 5:	27
5. Resultados de las propuestas consideradas	28
5.1. Comparativa de los planos frontales	31
5.2. Temperaturas en la parte frontal	31
5.3. Comparativa del flujo de aire a través del clúster	33
5.4. Comparativa de los planos de la parte posterior del clúster	36
5.5. Temperaturas en la parte posterior	36
5.6. Elección de la propuesta más adecuada	38
5.7. Revisión de la propuesta elegida	40
5.8. Modificaciones a la propuesta elegida	42
5.8.1. Efectos producidos por los cortes en las cortinas de los pasillos laterales	46
6. Conclusiones	47

Índice de figuras

1.1. Iluminación artificial en el planeta	4
1.2. Capacidad de generación de energía eléctrica en países miembros de la OCDE, 2008 ¹	5
1.3. Consumo mundial de combustibles y utilización de fuentes primarias para la generación de electricidad, 1980 – 2008	6
1.4. Generación bruta en el servicio público y participación por tipo de fuente energética, 2000 – 2011 (TWh - Participación porcentual)	7
3.1. Planos de la ubicación de los elementos dentro del cuarto de cómputo	17
3.2. Distribución de equipos en los módulos del clúster	17
3.3. Longitudes obtenidas en el cuarto de cómputo (valores en metros).	18
3.4. Malla creada para la simulación.	18
3.5. Anemómetro usado para mediones experimentales.	18
3.6. Configuración inicial	19
3.7. Plano transversal: extraído de la figura previa	19
3.8. Planos seleccionados para realizar las mediciones de temperatura y comparar datos medidos en el cuarto con los datos generados en la simulación.	20
3.9. plano frontal	21
3.10. plano posterior	21
3.11. Grafica de comparación de las temperaturas en el plano frontal	21
3.12. Grafica de comparación de las temperaturas en el plano posterior	21
3.13. Planos seleccionados para realizar la verificación de las velocidades en la simulación.	22
3.14. En esta figura se observa la inyección de aire a baja temperatura, al igual es visible la zona en la cual se tiene una mayor temperatura dentro del cuarto.	23
3.15. En esta figura se observa que se tiene flujo de aire caliente hacia la parte frontal del clúster.	23
3.16. Plano extraído de la parte superior del cuarto, en el que se observa los módulos que presentan una mayor temperatura.	23
3.17. Plano extraído de la parte lateral, en el se observa la trayectoria del aire que es inyectado.	23
3.18. Se observa cómo es que fluye una cantidad de aire por debajo del clúster y es extraído sin tener contacto con los equipos.	24

4.1. Configuración propuesta 1	25
4.2. Configuración propuesta 2	26
4.3. Configuración propuesta 3	26
4.4. Configuración propuesta 4	27
4.5. Configuración propuesta 5	27
5.1. Resultados propuesta 1	28
5.2. Resultados propuesta 2	29
5.3. Resultados propuesta 3	29
5.4. Resultados propuesta 4	30
5.5. Resultados propuesta 5	30
5.6. Resultados planos frontales configuración inicial y propuestas [1-5]	32
5.7. Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 1 y 2 comparadas con las temperaturas de la configuración inicial.	33
5.8. Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 3, 4 y 5 comparadas con las temperaturas de la configuración inicial.	33
5.9. Resultados planos laterales configuración inicial y propuestas [1-5]	35
5.10. Resultados planos de la parte posterior configuración inicial y propuestas [1-5]	37
5.11. Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 1 (P1) y 2 (P2) comparadas con las temperaturas de la configuración inicial (Tf).	38
5.12. Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 3 (P3), 4 (P4) y 5 (P5) comparadas con las temperaturas de la configuración inicial (Tf).	39
5.13. Planos en los que se muestra la reducción lograda con la configuración de la propuesta 3.	40
5.14. En esta imagen se muestran las temperaturas mas elevadas detectadas en los módulos de la propuesta 3	41
5.15. En esta gráfica se muestran los valores de temperatura obtenidos de la simulacion comparados con los medidos en el cuarto	41
5.16. Modificaciones a la propuesta 3	42
5.17. Comportamiento del aire inyectado	43
5.18. Flujo de aire por los cortes en el bloqueo	43
5.19. Planos frontales y posteriores generados por los cortes	44
5.20. Planos laterales y transversales del clúster	45
5.21. Flujo de aire hacia la parte frontal del clúster	46

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la educación en los niveles de bachillerato y por la oportunidad de adquirir los conocimientos necesarios para mi formación académica para el nivel de licenciatura dentro de las aulas de la Facultad de Ingeniería.

Al instituto de ingeniería de la UNAM, por la oportunidad de realizar este trabajo de tesis dentro de sus instalaciones.

Al Dr. Martín Salinas Vázquez y al Mtro. Juan Cristián López López por su apoyo en el desarrollo de este trabajo y por su paciencia para terminar la tesis.

A mis padres (Beatriz y Maximiliano) y hermanos (Mireya y José Abad), por apoyarme durante todos estos años y sobre todo por no perder su fe en mí.

A mis compañer@s y amig@s.

Resumen

En el presente trabajo se hace uso de código numérico para la simulación de la ventilación de un cuarto de cómputo, el cual tiene problemas de sobrecalentamiento en los equipos. Se realizaron mediciones dentro del cuarto para obtener las dimensiones y ubicaciones de los componentes, de igual forma se midieron temperaturas y velocidades del aire, para la validación del estado inicial del cuarto se realizaron comparaciones entre los valores de temperatura y velocidad del aire medidos y los generados en la simulación, una vez que se validó la simulación se analizó para poder identificar las causas y factores que ocasionan el sobrecalentamiento de los equipos. Posteriormente, se plantearon y simularon algunas modificaciones dentro del cuarto en las cuales se propone la creación de muros que eviten el flujo de aire por algunas zonas, en otras se modificaba la ubicación de la inyección y extracción de aire. Para elegir la propuesta más adecuada para la solución del sobrecalentamiento de los equipos se realizaron comparaciones entre los resultados de cada una de las propuestas, se identificó qué propuestas generaban resultados adecuados y cuáles no, se determinó que más de una propuesta lograba mantener los equipos dentro del rango de temperatura en el cual se puede garantizar el buen funcionamiento de los equipos, por lo cual se decidió tomar en cuenta que la propuesta seleccionada fuese la que menos modificaciones requiriera para su implementación.

La importancia de este trabajo es que al mejorar el funcionamiento del sistema de aire acondicionado se produce un mejor desempeño de los equipos, lo cual tiene como beneficios extra, un mejor aprovechamiento de la energía requerida para el funcionamiento del sistema de aire acondicionado.

Objetivos

1. Validar el código numérico usado para la simulación del sobrecalentamiento presente en un cuarto de cómputo.
2. Identificar las causas y factores que ocasionan el sobrecalentamiento de los equipos.
3. Proponer y simular algunas modificaciones dentro del cuarto que promuevan el enfriamiento de los equipos.
4. Comparar los resultados generados en la simulación de las propuestas para identificar la mejor opción para la reducción del sobrecalentamiento de los equipos.

Motivación

El problema que se presenta en el cuarto de cómputo, es una consecuencia de su uso. Al igual que cualquier otro aparato eléctrico cierta cantidad de energía es transformada en calor, además de que el calentamiento de los equipos de cómputo tiene como consecuencia una disminución de su rendimiento. Por tal motivo es necesario mantener los equipos a una temperatura que garantice su buen funcionamiento. Para esto se hace uso de sistemas de enfriamiento, en este caso del aire acondicionado. Si bien es un buen método para controlar la temperatura de los equipos de cómputo, se tiene que tener una ubicación adecuada de los dispositivos de inyección de aire frío y extractores de aire caliente, para así cumplir con el objetivo de mantener la temperatura de operación adecuada, además de lograr un uso eficiente de la energía.

En concreto, el problema presente en el cuarto de cómputo, es que el aire acondicionado no cumple con su objetivo de mantener una temperatura de operación adecuada en todos los equipos, por lo cual es necesario hacer algunas modificaciones dentro del cuarto de cómputo, en la ubicación de la entrada y salida del aire para lograr mantener la temperatura dentro de un intervalo en el cual se pueda garantizar el buen funcionamiento de los equipos de cómputo.

Capítulo 1

Estado del arte

1.1. Diseño bioclimático

En el desarrollo tradicional de edificaciones, por lo general no se toman en cuenta todas las variables que pueden influir en la comodidad de los ocupantes, lo cual induce el uso de recursos como el aire acondicionado y calefacción para lograr la comodidad deseada, para lo cual se hace uso de recursos naturales de forma inadecuada lo que tiene como consecuencia la contaminación del medio ambiente. Por tales motivos se intenta desarrollar edificios que se adecúen al medio ambiente en el cual son construidos y así tener un mejor uso de los recursos disponibles.

En el diseño se busca integrar arquitectura, ingeniería, hombre y medio ambiente para formar un todo equilibrado. En este modo de diseñar se intenta aprovechar la energía del sol durante el invierno y rechazarla en el verano. Para lo cual se recurre al uso de ventilación para combatir los problemas de humedad, al igual que para dirigir el aire caliente hacia el exterior. Se utiliza el aislamiento para reducir los intercambios térmicos con el exterior, se recurre a otras técnicas pasivas que son empleadas en la arquitectura popular desde tiempos remotos para lograr mayores niveles de confort en los usuarios.

El objetivo del diseño bioclimático es construir, tomando en cuenta los elementos climáticos con la construcción, tratando que sea esta misma la que regule los intercambios de materia y energía con el ambiente con el fin de que en el interior de la construcción se mantengan las condiciones que generen la sensación de bienestar térmico en los ocupantes, sin dejar de lado el aspecto estético de las construcciones.

En la actualidad existen normas oficiales mexicanas (NOM) que se tienen que cumplir respecto a la ganancia de calor en los edificios de nueva construcción, la NOM-020-ENER-2011 [PARA,] está enfocada hacia los edificios de uso habitacional y la NOM-008-ENER-2001 [Oficial, 2001] se enfoca en edificios de uso no residencial, dichas normas están orientadas hacia el ahorro y mejor utilización de los recursos energéticos.

1.1.1. Confort

Se refiere a las condiciones atmosféricas adecuadas que propicien una situación de bienestar, salud y comodidad, la cual supone que no se encuentre en el ambiente ninguna perturbación o molestia que afecte a los usuarios, como en el caso de viviendas, oficinas, teatros, etc. en términos industriales se entiende como la generación de condiciones atmosféricas adecuadas que satisfagan los requisitos particulares de los procesos.

Las condiciones de comodidad o confort térmico dependen de las variables del medio ambiente, como la temperatura, humedad, velocidad del aire y radiación incidente, las cuales pueden verse modificadas por la presencia de viento, el cual incrementa el mecanismo de transferencia de calor por convección, la presencia de radiación (calor emitido por el sol o superficies calientes) que dificulta la salida de calor del cuerpo humano, además de la pérdida de calor del cuerpo humano debido a superficies frías que lo rodean.

1.1.2. La inercia térmica y el aislamiento

Se puede intentar alcanzar condiciones confortables, con procedimientos naturales, no sólo desde el punto de vista energético y medioambiental, sino también desde el punto de vista de la salud y de un concepto distinto de bienestar, más próximo al hombre y la naturaleza. El modo bioclimático de acumulación de energía óptimo es la utilización de la propia masa del edificio, optimizando por tanto las inversiones constructivas. La masa térmica del edificio será, por tanto, el destino de la acumulación, y la inercia térmica, su consecuencia.

Valores altos de inercia térmica permiten conseguir uno de los objetivos más deseables en un edificio: la estabilidad térmica. Generalmente los edificios se ven permanentemente afectados por las variaciones climáticas externas, día-noche, invierno-verano, calor-frío, y por las condiciones de uso interiores, encendido-apagado de equipos eléctricos, apertura-cierre de ventanas, ocupación mayor-menor. Todo esto provoca una permanente variación de la temperatura interior que, en ocasiones, puede ser compensada con los sistemas de acondicionamiento y gasto de energía. El objetivo desde el punto de vista del bienestar es que la temperatura fluctúe sólo levemente y siempre dentro de los márgenes del bienestar, todo ello sin consumos excesivos de energía.

La influencia de la inercia térmica en el bienestar es particularmente importante durante los meses calurosos, ya que en este período se produce el efecto térmico del sobrecalentamiento. Dado que la mayor causa del sobrecalentamiento es la radiación solar, durante estos meses es muy importante proteger los huecos acristalados, con soluciones fijas, móviles o simplemente con la correcta orientación de los huecos.

1.1.3. Ventilación

La ventilación natural, por procedimientos pasivos o mecánicos, es una estrategia de acondicionamiento y ahorro de energía, pero también es un procedimiento que permite crear ambientes sanos y acogedores.

La ventilación natural se produce cuando existen diferencias de presión entre el interior y el exterior de una edificación. La ventilación más adecuada es la ventilación cruzada entre huecos situados en fachadas distintas. Dos fachadas distintas están necesariamente expuestas a presiones de viento distintas y, por tanto, se establecen diferencias de presión que provocan la ventilación natural. Si las fachadas son opuestas y una está sometida al viento, en ella se crearán presiones y en las opuestas depresiones, lo que hace que la ventilación sea más eficaz.

También se puede incrementar el efecto de la ventilación cruzada cuando los huecos están a alturas diferentes. Esto se puede conseguir dentro de un mismo espacio colocando uno de los huecos a la altura del techo. Resulta más eficaz colocar las entradas de aire en una planta y la salida en otra, conectándolas verticalmente para crear un mejor movimiento del aire. Sin embargo, la mayor eficacia se produce cuando la ventilación de salida se establece por la cubierta. En condiciones normales el aire caliente tiende a acumularse en el techo; si se abren huecos en la cubierta ese aire caliente tendrá una tendencia natural a salir, ayudado por la depresión que se establece en la cubierta, esto creará un tiro natural en todo el edificio.

El uso de huecos con tamaños diferentes afecta a su velocidad. Si el hueco de entrada es mayor que el de salida, el aire disminuirá de velocidad al entrar en el edificio y se acelerará, por efecto Venturi, a la salida; esto no representa ninguna ventaja ya que la velocidad es uno de los objetivos deseados ya que a mayor velocidad de aire, la sensación de calor percibida es menor. Sin embargo, si el hueco pequeño es el de entrada y el grande es el de salida, el efecto se invierte y el aire se acelera al entrar en el edificio; si se toma en cuenta que las velocidades del aire en general son reducidas, cualquier proceso de aceleración resulta interesante. Una buena combinación de estrategias, como los tamaños de huecos diferentes, el cambio de dirección de aire y la ventilación entre fachadas y plantas, sobre todo si es con la cubierta, darán lugar a una buena ventilación cruzada.

1.1.4. Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas) adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo del fluido, la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido aumenta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido.

Una forma de explicar la convección es haciendo la siguiente pregunta: ¿Cómo se calienta el aire del planeta? El sol transfiere calor a la tierra mediante radiación, (la cual no necesita materia para transferirse) la cual calienta la superficie terrestre, a su vez la superficie terrestre transfiere el calor al aire mediante conducción, lo cual solo afecta a las partículas de aire que este en contacto con la superficie, pero como efecto del aumento de temperatura, el aire disminuye su densidad lo que lo hace ascender para que el aire frío con mayor densidad ocupe su lugar, eso es lo que genera corrientes convectivas y así se transfiere el calor mediante convección.

Tipos de convección

Existen dos tipos de convección, una es la convección natural en la cual por diferencias de densidad se



Fuente: National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Figura 1.1: Iluminación artificial en el planeta

presenta el movimiento del fluido que hace posible la transferencia de calor y la otra es la convección forzada en donde el flujo convectivo no se da por la simple diferencia de densidad en el fluido, sino que es inducida por agentes externos como por ejemplo ventiladores.

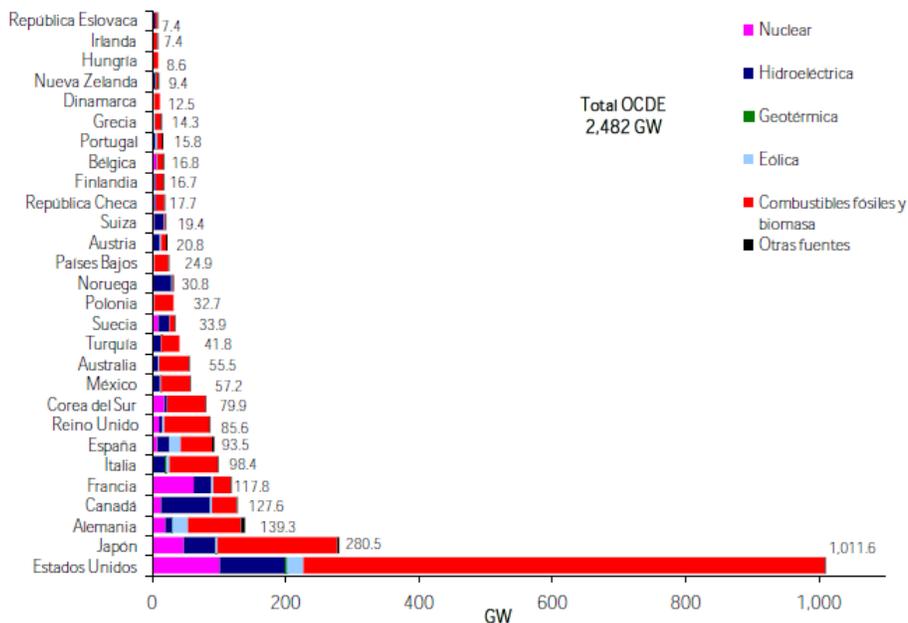
1.1.5. Necesidad de climatización

Una instalación de aire acondicionado no solo está destinada a producir enfriamiento del aire en la época de verano como muchas veces se considera, sino también para secarlo, calentarlo y humectarlo en las distintas estaciones del año, esto con la finalidad de producir en todo momento una adecuada ventilación y calidad del aire en el interior. En la actualidad se considera que edificios de todo tipo requieren aire acondicionado desde casas residenciales, departamentos, oficinas, hoteles, locales comerciales, cines, centros de cómputo, laboratorios, etc.

1.2. Energía eléctrica

A la fecha la energía eléctrica resulta ser indispensable tanto en el uso domestico, algunos medios de transporte y en la industria, uno de los usos más comunes de la electricidad es la iluminación. En la [Figura 1.1](#) se observa la iluminación artificial en el planeta y hace evidente el gran uso de la electricidad.

Si bien se dice que la energía eléctrica no contamina y por tal motivo es considerada como una



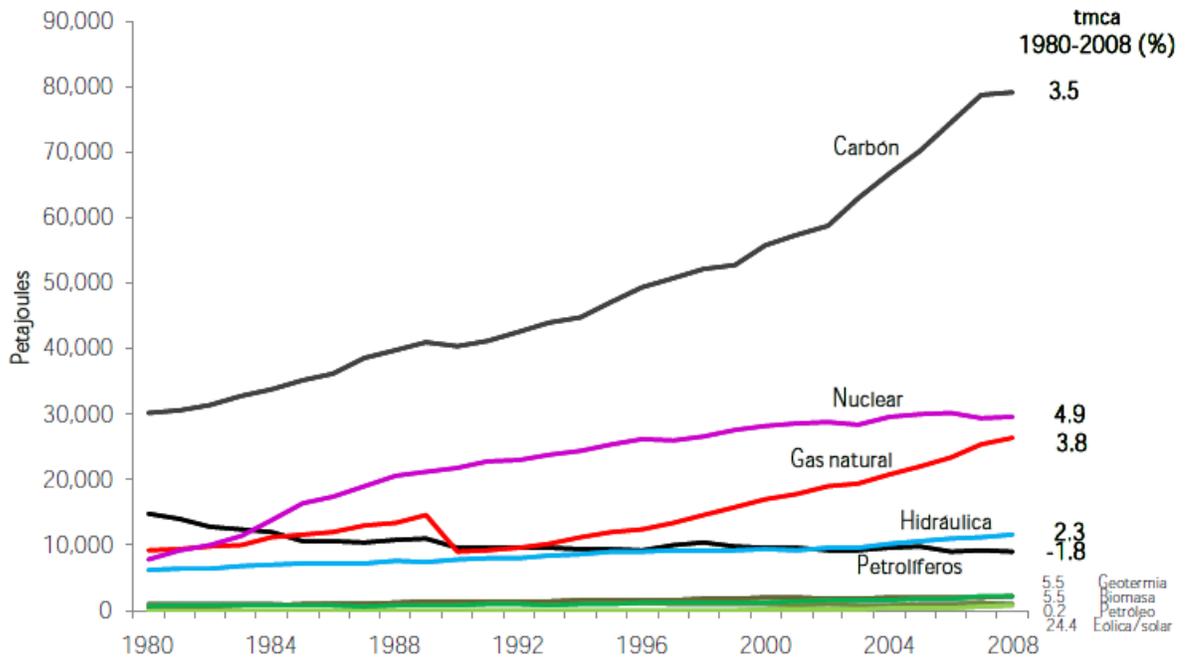
¹ Incluye generación centralizada y autogeneración de energía eléctrica. Por simplicidad y cifras no significativas, se omiten Luxemburgo e Islandia. Asimismo, debido a su reciente incorporación, se excluye a Chile, Eslovenia e Israel.
Fuente: Electricity Information 2010, International Energy Agency (IEA).

Figura 1.2: Capacidad de generación de energía eléctrica en países miembros de la OCDE, 2008¹

energía limpia, el hacer esa consideración no es del todo correcto ya que si bien en el lugar donde se utiliza no se generan gases contaminantes, en la producción de dicha energía se generan contaminantes, como por ejemplo en las plantas termoeléctricas en las cuales se utiliza algún combustible de origen fósil, en una central hidroeléctrica no se genera gases contaminantes, pero se producen efectos nocivos en el medio ambiente que la rodea, otra manera de generar electricidad es mediante centrales nucleares que tienen como consecuencia la generación de desechos peligrosos, existen formas de obtener electricidad sin perjudicar al medio ambiente pero son menos empleadas, en la [Figura 1.2](#) se presenta una grafica de la generación eléctrica de los países miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos), se hace evidente que para la generación eléctrica se recurre en gran medida al uso de combustibles fósiles, lo cual demuestra que la generación y por consecuencia el uso de energía eléctrica genera contaminantes.

1.2.1. Consecuencias del consumo de combustibles de origen fósil

A lo largo de la historia el uso de combustibles fósiles ha tenido un papel sumamente importante en el desarrollo industrial y económico a nivel mundial, pero con la creciente necesidad de energía, se ha incrementado el consumo, lo cual tiene consecuencias desfavorable para la vida en el planeta, generación de gases contaminantes producto de la quema de combustibles, entre los cuales se encuentran gases de efecto invernadero, que son un factor importante en el cambio climático que se está dando a nivel mundial, además de la afectación ecológica que se ocasiona para obtener y procesar los combustibles.



Fuente: International Energy Agency (IEA).

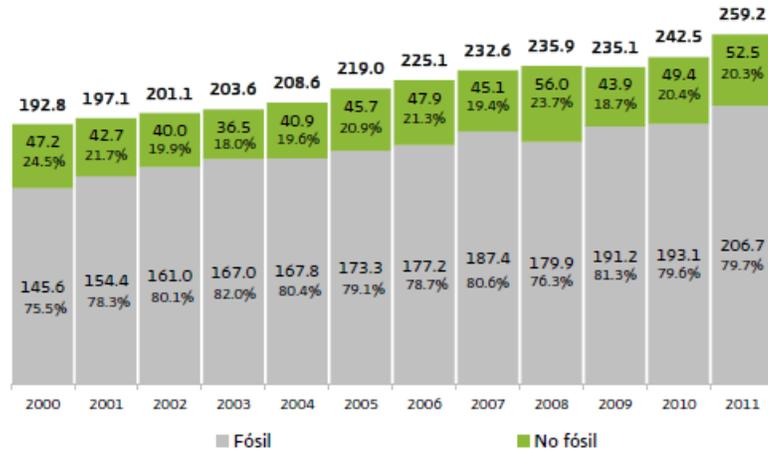
Figura 1.3: Consumo mundial de combustibles y utilización de fuentes primarias para la generación de electricidad, 1980 – 2008

1.2.2. Cambio climático

Se sabe que a lo largo de la vida del planeta se han presentado cambios notables en cuanto al clima como lo son el enfriamiento y calentamiento global, que son ciclos naturales presentes en el planeta, pero como consecuencia de la generación de gases de efecto invernadero productos de la quema de combustibles fósiles, se ha ocasionado un aceleramiento en los cambios climáticos del planeta, sobre todo un aumento en la temperatura global, lo cual puede tener consecuencias como: Un incremento en el nivel medio del mar a causa del deshielo de los polos, una mayor incidencia de temperaturas extremas, sequías, tormentas e inundaciones.

Como medida que intenta frenar la producción excesiva de gases de efecto invernadero se han creado políticas que limitan la expulsión de dichos gases hacia el ambiente, en particular se intenta controlar las emisiones de bióxido de carbono, pero con la disminución de fuentes energéticas como el petróleo se tiene mayor tendencia hacia el uso de combustibles que producen una mayor cantidad de gases contaminantes como el carbón, esto principalmente para la generación eléctrica en la [Figura 1.3](#) se puede observar el creciente uso de carbón para la generación eléctrica a nivel mundial. En nuestro país gran parte de la energía eléctrica generada es proveniente de la quema de combustibles fósiles, en la [Figura 1.4](#) se puede observar que cerca del 80% de la electricidad es generada a partir de combustibles fósiles.

Uno de los sectores que consumen gran cantidad de electricidad es el residencial, comercial y público, en donde una gran parte de la energía consumida se destina a cuestiones como la iluminación artificial en



Fuente: CFE.

Figura 1.4: Generación bruta en el servicio público y participación por tipo de fuente energética, 2000 – 2011 (TWh - Participación porcentual)

horas del día en que existe aportación de luz natural y al uso sistemas para generar condiciones de confort, estos usos son ocasionados por un diseño de edificaciones no adecuado para las condiciones climáticas del lugar.

1.3. Sistema de aire acondicionado

Se puede definir un sistema de aire acondicionado como un proceso que permite controlar condiciones de temperatura, humedad, circulación y pureza del aire, para proporcionar confort y adecuar las condiciones de algún proceso dentro de un lugar cerrado.

El uso de sistemas de aire acondicionado tienen una gran variedad de aplicaciones, una de ellas es el control de las condiciones dentro de salas de cómputo para un buen funcionamiento, en donde el objetivo es mantener la temperatura dentro de un determinado rango evitando el sobrecalentamiento de los equipos, además en ciertas regiones es necesario un control de la humedad del aire para evitar el fenómeno de condensación del agua contenida en el aire ya que esta puede causar fallas en los equipos.

1.3.1. Aire acondicionado de confort y de precisión

No se debe climatizar un centro de procesamiento de datos por pequeño que sea, con un sistema de aire acondicionado de confort. Existe una gran diferencia entre climatizar equipos electrónicos y proporcionar un ambiente agradable para el confort de las personas. Para empezar, la gente agrega humedad al ambiente y los equipos no. De tal manera que se debe tomar en consideración el “enfriamiento latente” (la habilidad de remover la humedad) y el “enfriamiento sensible” (la habilidad de remover calor seco). Los aires acondicionados de ventana y los sistemas centrales en los edificios de oficinas están diseñados con una relación de enfriamiento sensible de alrededor de 0,60 a 0,70. Lo anterior significa que el 60 – 70 % del

trabajo que un sistema de confort hace es remover calor y el otro 30 – 40 % es remover humedad. Eso es suficiente para una habitación llena de gente con un tráfico moderado entrando y saliendo de la misma. En cambio, el aire acondicionado de precisión tiene una relación mucho más alta de enfriamiento sensible a enfriamiento total de 0,85 a 0,95. Esto es, el 85 – 95 % del trabajo del Sistema de Precisión se dedica al enfriamiento efectivo del aire y apenas el 5 – 15 % a remover la humedad. Es decir, que hay dos cosas importantes a la hora de enfriar un Centro de procesamiento de datos:

1) Se tendrá que instalar mayor capacidad de aire acondicionado de confort para obtener los mismos resultados de un sistema de aire acondicionado de precisión.

2) Un sistema de confort extraerá humedad por debajo de los límites aceptables para la operación eficiente de los equipos. Lo cual significa que, o se expone a los problemas ocasionados por un ambiente muy seco, o se tendrá que adquirir sistemas de humidificación adicionales. Con un sistema de precisión no existen tales problemas. Por un lado, no extraerá tanta humedad de aire y por otro, viene provisto de un sistema de humidificación integral que mantendrá la humedad relativa exigida por los fabricantes.

Otra gran diferencia entre sistemas de confort y de precisión es el volumen de aire que deberá moverse. Un sistema de precisión lo hará a través de los serpentines de enfriamiento a casi el doble de volumen que un sistema de confort para alcanzar su alta relación de enfriamiento total, manejar la densa carga térmica en los CPD y mantener, estrictamente, los niveles de temperatura y humedad relativa programados previamente. El movimiento de volúmenes mayores contribuye a una mejor filtración de aire.

1.4. Centros de procesamiento de datos

El centro de datos es el núcleo de una red donde se procesan, redirigen y almacenan los datos. El aumento de la eficiencia se está volviendo cada vez más importante a medida que se ponen en línea más aplicaciones con uso intensivo de datos. La carga de trabajo que se requiere que administre el centro de datos aumenta cada vez más. Con lo cual, el espacio del clúster de los centros de datos, las vías para cables, enfriamiento, instalación, mantenimiento y evitar riesgos se están volviendo asuntos cada vez más importantes en el momento de planear y diseñar los centros de datos, lo cual tiene como objetivo obtener el mejor rendimiento posible de los equipos de cómputo.

Uno de los puntos importantes en los centros de datos es el acondicionamiento ambiental, pues un sistema de enfriamiento adecuado garantiza un buen funcionamiento de los servidores, lo que implica que el sistema de climatización sea eficiente.

Actualmente es muy común encontrar centros de datos con problemas de sobrecalentamiento. Para solucionar este problema los operadores buscan (en primera instancia) disminuir de forma drástica la temperatura de la sala. Esta acción genera grandes pérdidas energéticas, temperaturas bajas incómodas para el personal y los puntos calientes en los equipos de cómputo no desaparecen por completo debido a un diseño inadecuado.

Sin importar cuál sea la densidad de procesamiento, resulta posible implementar soluciones de enfriamiento que garanticen las condiciones adecuadas de temperatura y humedad relativa requerida para un buen funcionamiento de los equipos.

El diseño del sistema de enfriamiento de un centro de datos requiere de un análisis detallado de la sala, tomando en cuenta su tamaño, la distribución de componentes y la densidad existente en los equipos

de cómputo, luego se determina cuál es la solución de enfriamiento más adecuada, la cual será distinta para cada caso.

En la actualidad, la conservación ambiental es un tema de gran impacto. Dado que el sistema de enfriamiento representa el mayor componente de consumo energético en un centro de datos (cerca al 50%), la implementación de técnicas como “pasillo caliente/pasillo frío” y los confinamientos ayudan a mejorar significativamente la eficacia del uso de energía.

A medida que se desarrollan nuevas tecnologías, los sistemas de enfriamiento para centros de datos de nueva generación deben enfrentarse a densidades de potencia más altas. Por lo cual los diseños y adecuaciones realizadas a través de la experiencia y el desarrollo de nuevos sistemas de aire acondicionado de precisión, ofrecen la garantía de un centro de datos con máxima eficiencia y disponibilidad.

1.4.1. Sistemas de enfriamiento

Se consideran tres tipos de sistemas de enfriamiento para centros de datos los cuales son: enfocado a cuartos, encaminado a filas y dirigido a gabinetes.

Room

Enfocado a cuartos consiste en un sistema de enfriamiento tradicional, se trata de un sistema útil para distribuir aire cuando la densidad de carga térmica por tipo de gabinete es baja (3kW por gabinete). Los equipos de aire acondicionado instalados en el perímetro del cuarto inyectan aire frío mediante una cámara plana que se crea a partir de la instalación de piso falso. El espacio que queda entre el piso falso y el piso firme permite distribuir el aire frío hacia la parte frontal del gabinete. El aire frío es absorbido por los equipos que se encuentran dentro del gabinete y después, sale por la parte posterior como aire caliente, el cual viaja de regreso a la parte superior de los equipos de aire acondicionado.

In-row

Sistema de enfriamiento para expansión directa, enfocado en filas. Ideal cuando se tiene una densidad media o alta en los gabinetes (entre 5 y 10 kW). Con este sistema se acercan los equipos de aire lo más posible a los puntos en donde se genera el calor y en donde se requiere enfriamiento, es decir, a los servidores. Se intercalan los equipos de aire acondicionado con un diseño muy similar a un gabinete de comunicaciones, se inyecta aire directamente al pasillo contiguo a los gabinetes, donde las trayectorias de aire frío son más predecibles y mejor absorbidas por los servidores. Una vez que se han absorbido, el aire caliente que sale por detrás es aspirado por los equipos de aire intercalados en la fila. Las trayectorias de aire caliente son mucho más cortas en comparación con las de un equipo perimetral. Cabe destacar que estos productos se ofrecen en diferentes configuraciones, ya sea con enfriamiento por aire o por fluidos.

Rack

Sistema de enfriamiento enfocado en gabinetes. Es el más adecuado cuando se trata de un centro de datos de baja densidad con un grupo de gabinetes de muy alta densidad (arriba de 10 kW). Se utiliza un equipo de aire específico para enfriar un grupo de gabinetes que se encuentran contenidos en un sistema, es decir, se rodea de aire el gabinete. El aire frío queda encerrado dentro del sistema de contención del gabinete, mientras que el aire caliente generado es contenido en su parte posterior. Con este sistema se tienen dos tipos de contenciones: la del gabinete y la del pasillo. De este modo se evita que el aire frío se disperse por cualquier lado y se enfoca sobre los gabinetes, sin que el aire caliente se extienda por todo el centro de datos.

1.4.2. Técnicas para el enfriamiento de los cuartos de cómputo

1. Generar una buena distribución de pasillos fríos y pasillos calientes. Consiste en evitar al máximo las mezclas de aire que existen en el centro de datos, que el aire frío se quede únicamente en la parte frontal de los gabinetes, de tal forma que se pueda inyectar aire frío a una temperatura adecuada y recuperar el aire caliente a una temperatura alta para hacer más eficiente el funcionamiento del sistema.

2. Evitar mezclas de aire. Se logra al instalar paneles ciegos entre los servidores que se encuentran dentro del gabinete. Con el fin de evitar que el aire frío pase hacia la parte posterior y se mezcle con el aire caliente.

3. Dirigir el aire frío hacia lo que importa enfriar. En este caso, hacia los gabinetes de cómputo, ya que dentro de un centro de datos no sirve enfriar cuartos completos si los servidores se encuentran calientes o están trabajando a una temperatura fuera de su rango operativo. Por esa razón, entre más se focalice el aire en donde realmente se necesita, el proceso de enfriamiento de los gabinetes será mejor.

Capítulo 2

Ecuaciones de gobierno

Ecuación general de conservación

Típicamente las ecuaciones de gobierno de la Mecánica de Fluidos, como las que describen la conservación de masa, momento o energía, están expresadas en términos de variables específicas o intensivas, es decir, de cantidades expresadas por unidad de masa. Considerando una variable específica ϕ definida sobre un volumen de control (VC) de dimensiones $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. la variación temporal de la variable en dicho volumen de control se puede considerar a partir del principio de conservación como: El incremento de ϕ en el VC respecto del tiempo es igual a la suma del flujo neto de ϕ que entra en el VC por las superficies más la generación neta de ϕ en el interior del VC respecto del tiempo.

Ecuación general de conservación en forma vectorial:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{Termino temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi)}_{\text{Termino convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{Termino difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{Termino fuente}} \quad (2.1)$$

Donde:

Termino temporal: representa la variación local con el tiempo en el interior del volumen de control; es decir, la acumulación o disminución de ϕ .

Termino convectivo: representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.

Termino difusivo: corresponde con alguno de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular: la ley de Fourier para la difusión de calor; la ley de Fick para la difusión de masa o de la ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos.

Termino fuente: para tener en cuenta fuentes de generación o destrucción de la variable transportada.

2.1. Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones de gobierno para flujo compresible de Navier Stokes en coordenadas cartesianas [Vázquez and Métais, 2002] pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = S \quad (2.2)$$

El primer término es la variación en el tiempo, el segundo es la divergencia de los flujos en notación indicial $i = 1, 2, 3$ y el último corresponde a los términos fuentes. Donde U es un vector de cinco componentes definido por:

$$U = (\rho, \rho u_1, \rho u_2, \rho u_3, \rho T)^T \quad (2.3)$$

Se considera que el vector de velocidad $u = (u_1, u_2, u_3) = (u, v, w)$ y ρ la densidad, los flujos están expresados de la siguiente forma:

$$F_i = \begin{pmatrix} \rho u_1 \\ p\rho u_i u_1 + p\delta_{i1} - 2\mu S_{i1} \\ p\rho u_i u_2 + p\delta_{i2} - 2\mu S_{i2} \\ p\rho u_i u_3 + p\delta_{i3} - 2\mu S_{i3} \\ (\rho T) u_i - k \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Las componentes del vector F_i representa la ecuación de continuidad en el primer término, del segundo al cuarto son las ecuaciones de Navier Stokes y el quinto es la ecuación de la energía. Donde $k = \rho C_p \alpha$ conductividad térmica y α la difusividad, δ_{ij} es el índice de Kronecker y S_{ij} es el tensor de deformación expresado en notación indicial

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \delta_{ij} \right) \quad (2.5)$$

En lugar de utilizar la ecuación de continuidad artificial (enfoque compresibilidad artificial, [Chorin, 1967]), en la presente tesis se sustituirá en las ecuaciones compresibles de Navier Stokes de acuerdo con la ecuación de estado para un fluido cuasi-incompresible [Perrin and Hu, 2006].

$$P = \rho c^2 \quad (2.6)$$

Donde c es la velocidad del sonido en un fluido, p es la presión y ρ la densidad. Cuando el número de Mach es pequeño ($Ma < 0,1$) (de forma adimensional $P = \frac{\rho}{Ma^2}$) y la variación en la temperatura no es muy grande, la solución a este conjunto de ecuaciones puede acercarse al límite incompresible.

Por último S_F donde se encuentran los términos fuentes, para este caso términos de fuerza gravitacionales (aproximación incompresible)

$$\begin{aligned}
S_F &= (S_\rho, S_{\rho u}, S_{\rho v}, S_{\rho\omega}) \\
S_\rho &= S_{\rho u} = S_{\rho v} \\
S_{\rho\omega} &= g\Delta\rho = \frac{\beta\Delta T}{Fr^2}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

2.2. Simulación de Grandes Escalas

El modelo de turbulencia de grandes escalas LES (por sus siglas en ingles) simula las grandes escalas de la turbulencia del flujo y las pequeñas escalas son filtradas, el efecto de ellas repercute en el movimiento de las grandes escalas a partir de un modelo submalla.

Desde el punto de vista matemático, las ecuaciones LES emplean un promediado espacial de las ecuaciones de transporte mencionadas anteriormente $G\Delta(x)$ mediante un filtro de tamaño Δ que sirve de frontera entre las macroescalas a resolver y las microescalas a modelar.

La convolución se define como:

$$\vec{f}(x, t) = \int \vec{f}(x, t) G_\Delta(x - y) dy \tag{2.8}$$

Donde Δ es el tamaño del filtro. La parte submalla es la desviación del flujo respecto a la variable instantánea, quedando:

$$f(x, t) = \vec{f}(x, t) + f'(x, t) \tag{2.9}$$

Aplicando el filtro a las [ecuaciones 2.2](#) y ahora adimensionalizadas obtenemos:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \vec{F}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \vec{F}_3}{\partial x_3} = S_F \tag{2.10}$$

Definiendo al promedio de Favre con el campo filtrado sobre el instantáneo

$$\tilde{f} = \frac{\overline{\rho f}}{f} \tag{2.11}$$

$$\bar{U} = \left(\bar{\rho}, \bar{\rho}\tilde{u}_1, \bar{\rho}\tilde{u}_2, \bar{\rho}\tilde{u}_3, \bar{\rho}\tilde{T} \right)^T \quad (2.12)$$

Los flujos \tilde{F}_i son:

$$\tilde{F}_i = \begin{pmatrix} \bar{\rho}u_1 \\ \overline{\rho u_i u_1} + \frac{\bar{p}}{\gamma M^2} \delta_{i1} - \frac{2\mu}{Re} \overline{S_{i1}} \\ \overline{\rho u_i u_2} + \frac{\bar{p}}{\gamma M^2} \delta_{i2} - \frac{2\mu}{Re} \overline{S_{i2}} \\ \overline{\rho u_i u_3} + \frac{\bar{p}}{\gamma M^2} \delta_{i3} - \frac{2\mu}{Re} \overline{S_{i3}} \\ \overline{(\rho T) u_i} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{k}{Re Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Donde el número de Reynolds y de Prandtl están definidos de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}; Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.14)$$

Con la ecuación de estado filtrada

$$\bar{p} = Ma^2 \bar{\rho} \quad (2.15)$$

Se introduce el tensor esfuerzo submalla τ con componentes:

$$\bar{\tau}_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} + \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (2.16)$$

Dividiendo el tensor de esfuerzos submalla en su parte deviatórica e isotrópica podemos escribir la igualdad

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} - \underbrace{\frac{1}{3} \tau_{ll} \delta_{ij}}_{\tau_{ij}} + \frac{1}{3} \tau_{ll} \delta_{ij} \quad (2.17)$$

Las [ecuaciones 2.13](#) pueden leerse como:

$$\tilde{F}_l = \begin{pmatrix} \bar{\rho}\tilde{u}_l \\ \bar{\rho}\tilde{u}_1\tilde{u}_l + \frac{\bar{p}-\frac{1}{3}\tau_{ll}}{\gamma M^2} \delta_{l1} - \tau_{l1} - \frac{2\mu}{Re} \overline{S_{l1}} \\ \bar{\rho}\tilde{u}_2\tilde{u}_l + \frac{\bar{p}-\frac{1}{3}\tau_{ll}}{\gamma M^2} \delta_{l2} - \tau_{l2} - \frac{2\mu}{Re} \overline{S_{l2}} \\ \bar{\rho}\tilde{u}_3\tilde{u}_l + \frac{\bar{p}-\frac{1}{3}\tau_{ll}}{\gamma M^2} \delta_{l3} - \tau_{l3} - \frac{2\mu}{Re} \overline{S_{l3}} \\ \overline{(\rho T) u_l} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{k}{Re Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Los modelos típicos de submalla basados en una viscosidad turbulenta cierran el sistema y se presentan a continuación

$$\tau_{ij} = \bar{\rho} C_p \mu_t S_{ij} \quad (2.19)$$

$$Q_{ij} = \bar{\rho} C_p \frac{\mu}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.20)$$

Cuando el número de Reynolds es alto los términos difusivos como la viscosidad molecular es considerada de menos relevancia, entonces tenemos:

$$\tilde{F}_l = \begin{pmatrix} \bar{\rho} \tilde{u}_l \\ \bar{\rho} \tilde{u}_1 \tilde{u}_l + \bar{\omega} \delta_{i1} - 2(\bar{\mu} + \bar{\rho} \nu_t) \tilde{S}_{l1} \\ \bar{\rho} \tilde{u}_2 \tilde{u}_l + \bar{\omega} \delta_{i2} - 2(\bar{\mu} + \bar{\rho} \nu_t) \tilde{S}_{l2} \\ \bar{\rho} \tilde{u}_3 \tilde{u}_l + \bar{\omega} \delta_{i3} - 2(\bar{\mu} + \bar{\rho} \nu_t) \tilde{S}_{l3} \\ (\bar{\rho} T) \tilde{u}_l - (\bar{k} + \bar{\rho} C_p \frac{\nu_t}{Pr_t}) \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Obsérvese que uno de los aspectos notables de esta formulación es que el sistema LES se puede deducir fácilmente de las ecuaciones compresibles de Navier Stokes con los siguientes cambios:

$$u_i \rightarrow \tilde{u}_i, \quad \rho \rightarrow \bar{\rho}, \quad p \rightarrow \bar{\omega}, \quad \mu \rightarrow \bar{\mu} + \bar{\rho} \nu_t, \quad k \rightarrow \bar{k} + \bar{\rho} C_p \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (2.22)$$

Las expresiones para ν_t y Pr_t utilizadas en las simulaciones compresibles corresponden a los modelos incompresibles descritos en [Lesieur and Metais, 1996], con la modificación se la utilización del promedio de Favre. El modelo submalla está considerado por [David, 1993] con la viscosidad molecular dada por:

$$\nu_t(x, \Delta, t) = C_{ssf} \Delta \sqrt{F_2(x, \Delta, t)} \quad (2.23)$$

Donde C_{ssf} puede ser expresado como función de la constante de Kolmogorov C_K ; $C_{ssf} = f(C_K^{-3/2})$. C_{ssf} toma el valor de 0,104 para $C_K = 1,4$. Δ se toma igual a $(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$, donde $\Delta x, \Delta y$ y Δz , son los tamaños de la malla locales en las tres direcciones espaciales.

$\tilde{F}_2(x, \Delta, t)$ es la función de estructura de segundo orden de la velocidad construida con el campo \tilde{u} . \tilde{F}_2 es calculado en el punto x con un promedio estadístico local de las diferencias de la velocidad de cuadro de los seis puntos más cercanos que rodean al punto x en la malla computacional. La interpolación se basó sobre la ley de $\frac{2}{3}$ de Kolmogorov que se usa para la función estructura de la velocidad.

Según lo propuesto por [David, 1993], la viscosidad turbulenta se apaga cuando la turbulencia no es lo suficientemente tridimensional. El criterio para tres dimensiones es definido como sigue: considérese

en un momento dado que el ángulo entre el vector de vorticidad en un punto dado de la malla y su medio aritmético de los seis puntos vecinos más cercanos. La viscosidad turbulenta se cancela en los puntos donde este ángulo es más pequeño que 20° . Finalmente, el número de Prandtl turbulento se toma igual a 0,6, con lo que cierra la ecuación de la energía.

2.3. Esquema numérico

El sistema en coordenadas generalizadas se resuelve por medio de una extensión del complemento esquema McCormack, de segundo orden en el tiempo y cuarto orden en el espacio, desarrollando por [Gottlieb and Turkel, 1976]. Debe observarse que cuando se usa U tiende a ser reemplazada por \bar{U} . El esquema numérico es un esquema corrector-predicor definido en una dimensión por:

$$U_j^1 = U_j^n + \frac{1}{6}\lambda(-f_{j+2}^n + 8f_{j+1}^n - f_j^n) + (\delta t) S_j^n \quad (2.24)$$

Corrector:

$$U_j^{n+1} = \frac{1}{2}(U_j^n + U_j^1) + \frac{1}{12}\lambda(7f_{j-2}^1 - 8f_{j-1}^1 - f_j^1) + \frac{1}{2}(\delta t) S_j^1 \quad (2.25)$$

Los índices (n) , $(n+1)$ y (1) simbolizan respectivamente para los valores de la función al tiempo t , tiempo $t+\delta t$ y al paso-sub-tiempo. Obsérvese que las discretizaciones espaciales intermedias son esquemas no centrados de primer orden con un predictor adelantado (upwind), y un corrector atrasado (downwind). Como se especifica arriba el esquema resultante es de cuarto orden en el espacio. La formulación generalizada en tres dimensiones se escribe:

Predictor:

$$\begin{aligned} U_{i,j,k}^1 = U_{i,j,k}^n - J_{i,j,k}^P & \left[\frac{\Delta t}{\Delta \xi_1} \left[\frac{7}{6} (\widehat{F}_{i+1,j,k}^n - \widehat{F}_{i,j,k}^n) - \frac{1}{6} (\widehat{F}_{i+2,j,k}^n - \widehat{F}_{i+1,j,k}^n) \right] \right. \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta \xi_2} \left[\frac{7}{6} (\widehat{G}_{i,j+1,k}^n - \widehat{G}_{i,j,k}^n) - \frac{1}{6} (\widehat{G}_{i,j+2,k}^n - \widehat{G}_{i,j+1,k}^n) \right] \\ & \left. + \frac{\Delta t}{\Delta \xi_3} \left[\frac{7}{6} (\widehat{H}_{i,j,k+1}^n - \widehat{H}_{i,j,k}^n) - \frac{1}{6} (\widehat{H}_{i,j,k+2}^n - \widehat{H}_{i,j,k+1}^n) \right] \right] \end{aligned} \quad (2.26)$$

Corrector:

$$\begin{aligned} U_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{2} [U_{i,j,k}^1 - U_{i,j,k}^n] - \frac{1}{2} J_{i,j,k}^C & \left[\frac{\Delta t}{\Delta \xi_1} \left[\frac{7}{6} (\widehat{F}_{i,j,k}^1 - \widehat{F}_{i-1,j,k}^1) - \frac{1}{6} (\widehat{F}_{i-1,j,k}^1 - \widehat{F}_{i-2,j,k}^1) \right] \right. \\ & + \frac{\Delta t}{\Delta \xi_2} \left[\frac{7}{6} (\widehat{G}_{i,j,k}^1 - \widehat{G}_{i,j-1,k}^1) - \frac{1}{6} (\widehat{G}_{i,j-1,k}^1 - \widehat{G}_{i,j-2,k}^1) \right] \\ & \left. + \frac{\Delta t}{\Delta \xi_3} \left[\frac{7}{6} (\widehat{H}_{i,j,k}^1 - \widehat{H}_{i,j,k-1}^1) - \frac{1}{6} (\widehat{H}_{i,j,k-1}^1 - \widehat{H}_{i,j,k-2}^1) \right] \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Capítulo 3

Configuración inicial

Para poder realizar la simulación del estado inicial del cuarto de cómputo se realizaron mediciones del cuarto de cómputo, para así tener las ubicaciones y dimensiones (ver [Figura 3.3](#)) de los elementos involucrados. Se crearon los planos mostrados en la [Figura 3.1](#) que se usaron para crear la simulación numérica. El clúster cuenta con nueve módulos, la densidad de equipos de cómputo en cada módulo se muestra en la [Figura 3.2](#) en donde se enumeran los módulos para así poder hacer referencias posteriores.

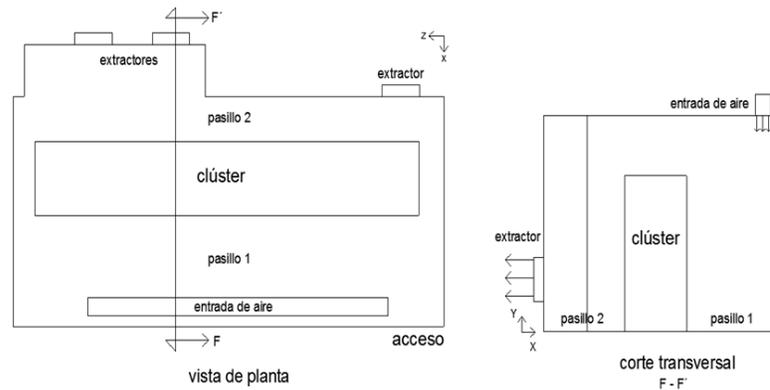


Figura 3.1: Planos de la ubicación de los elementos dentro del cuarto de cómputo

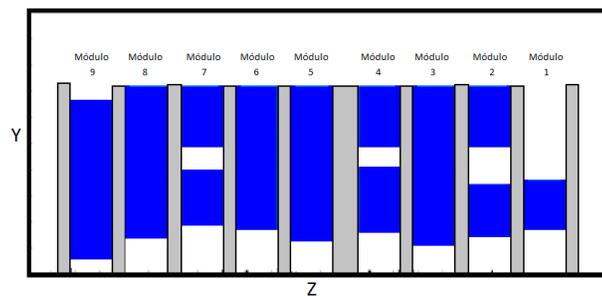


Figura 3.2: Distribución de equipos en los módulos del clúster

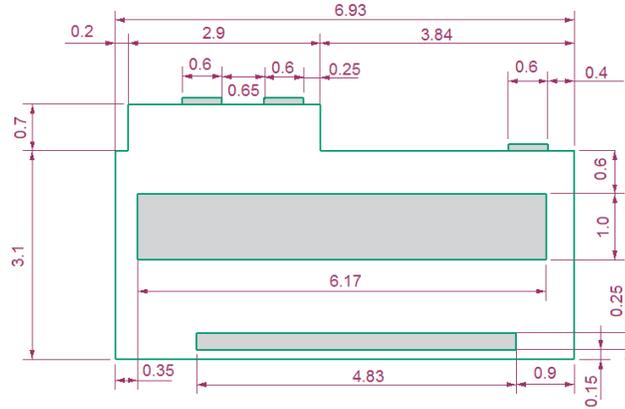


Figura 3.3: Longitudes obtenidas en el cuarto de cómputo (valores en metros).

El cuarto tiene una altura de $2,9m$, el clúster de $2,1m$ medidos desde el piso, los postes que forman el clúster son de un grosor de $0,15m$ (entre los módulos 4 y 5 hay dos postes juntos), los extractores son del mismo tamaño $0,36m^2$ el extractor que se encuentra detrás del primer módulo esta a una altura de $0,25m$ desde el piso, los dos restantes parten de una altura de $0,38m$. Se utilizó una malla regular de $160 \times 120 \times 100$ nodos en la [Figura 3.4](#) se muestra la malla de forma representativa ya que la utilizada cuenta con mayor resolución, y en la [Figura 3.5](#) se muestra el anemómetro usado en las mediciones experimentales de temperatura y velocidad del aire en el cuarto.

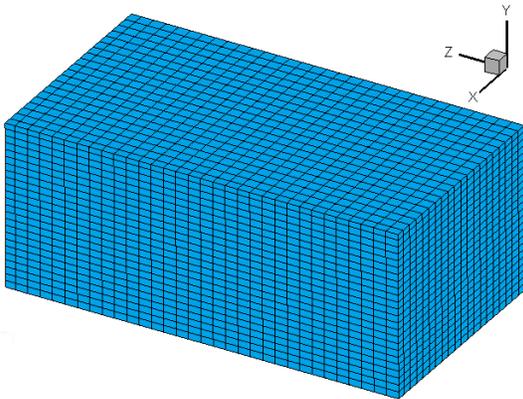


Figura 3.4: Malla creada para la simulación.



Figura 3.5: Anemómetro usado para mediciones experimentales.

Como se mencionó anteriormente la configuración del sistema de aire acondicionado en el cuarto de cómputo no cumple con el objetivo, ya que al hacer mediciones de temperaturas en las cercanías de los equipos se observa que estas están por encima de los rangos que permiten un óptimo desempeño de los equipos. Mediante el uso de programación y de los planos del cuarto se creó un modelo que representa el estado inicial del cuarto de cómputo. En la [Figura 3.6](#) se muestra la configuración inicial creada numéricamente, en la cual se presentan las ubicaciones de los componentes del sistema de enfriamiento además de la ubicación de los equipos de cómputo y un plano transversal, el cual se muestra de manera mas detallada en la [Figura 3.7](#) en ella se muestran las condiciones establecidas para la simulación.

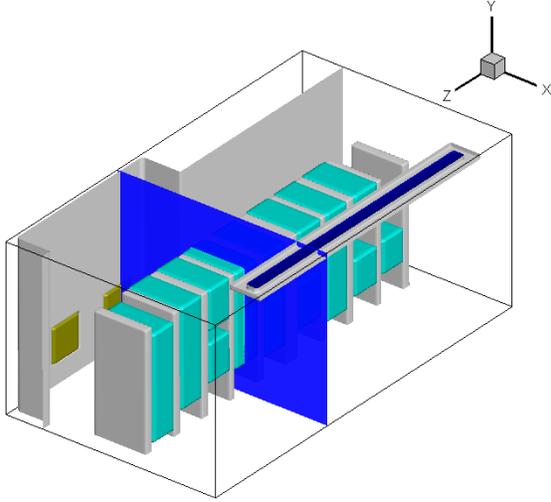


Figura 3.6: Configuración inicial

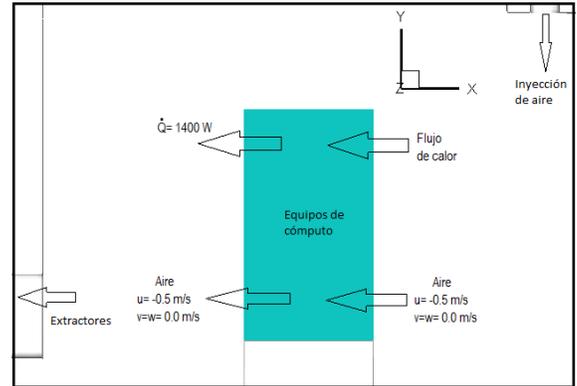


Figura 3.7: Plano transversal: extraído de la figura previa

3.1. Condiciones iniciales y de frontera

Al inicio de la simulación se considero velocidad nula y temperatura ambiente de $T_{amb} = 20^{\circ}C$. Para poder resolver las ecuaciones de gobierno de manera adecuada es necesario establecer las condiciones que definen el fenómeno que se pretende analizar. Para las condiciones de entrada de aire en el cuarto se realizaron las mediciones pertinentes para determinar los valores adecuados tanto de velocidad como de temperatura, la velocidad medida es de $2m/s$, en términos de componentes la velocidad queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ v &= -2 \\ w &= 0 \end{aligned}$$

Según el marco de referencia observado en la [Figura 3.6](#). Para la temperatura del aire en la inyección se determino el valor de:

$$T = 18^{\circ}C$$

Otro valor de interés es la generación de calor en los equipos de cómputo la cual se obtuvo de datos proporcionados por el fabricante en este caso es de $1400watts$.

Otros valores medidos en el cuarto de cómputo y considerados necesarios para la simulación de la configuración inicial son la velocidad del aire en los extractores la cual se midió en cada extractor considerando una velocidad media de $1,5m/s$, de igual forma se realizaron mediciones de la velocidad del aire al entrar y salir de los equipos de cómputo con lo que se opto por considerar una velocidad de $0,5m/s$ en todos los equipos.

Las paredes del cuarto de cómputo se consideran isotérmicas (la temperatura permanece constante), se hace la misma consideración con los estantes en los que se encuentran los equipos de cómputo, en las partes que son consideradas adiabáticas no se realizan cálculos, los equipos de cómputo se simularon de manera que actúen como una fuente de calor al interior del cuarto, los cuales son presentados gráficamente en forma de prismas rectangulares (los espacios vacíos representan donde no hay componentes).

3.1.1. Consideraciones

Al definir las condiciones iniciales y de frontera además de realizar las mediciones necesarias, se hizo uso de cuestiones como la continuidad para la inyección y entrada de aire, además de que en la parte de la inyección de aire se considera que el flujo es uniforme, que la generación de calor es la misma en cada uno de los componentes y que la velocidad del aire es la misma al pasar por los componentes.

3.2. Validación de la simulación

Se realizó la simulación con la configuración inicial, para lo cual se desechó la parte del estado transitorio, es decir la parte en la cual el sistema presenta grandes variaciones, ya que esta parte no es de utilidad para compararse con los valores de las variables medidas en el cuarto, hasta que esta llegara a un estado permanente (los valores medios ya no presentan variaciones), para la visualización gráfica de los resultados se hizo uso de un programa de post-procesamiento (Tecplot 360), se compararon las mediciones de temperaturas del cuarto de cómputo con los valores obtenidos mediante la simulación. Para realizar la comparación se decidió tomar mediciones de temperatura a una altura de un metro desde el nivel de piso y a una distancia de diez centímetros de cada componente, todas las mediciones en la parte media de cada componente tanto enfrente como detrás de los componentes, en la [Figura 3.8](#) se muestra la ubicación de los planos seleccionados para hacer las comparaciones de los resultados de la simulación con los valores medidos en el cuarto de cómputo.

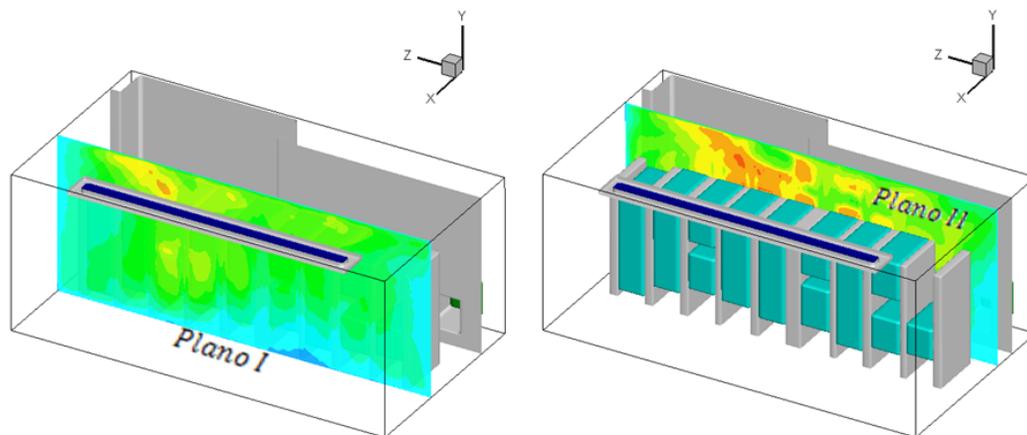


Figura 3.8: Planos seleccionados para realizar las mediciones de temperatura y comparar datos medidos en el cuarto con los datos generados en la simulación.

De los planos extraídos en la [Figura 3.9](#) se muestra el plano I (de la parte de enfrente del clúster) en donde se observan zonas de temperatura las cuales en su mayoría se encuentran en un rango de 21 a 25 grados Celsius. Se observan algunas zonas con temperaturas elevadas cerca del techo y la zona de menor temperatura cercana al piso en la parte baja de los módulos 1 a 5. En la [Figura 3.10](#) se muestra el plano II (de la parte trasera del clúster) en este plano se tienen zonas con temperaturas entre los 25 y 30 grados Celsius que exceden el rango en el cual los equipos de cómputo funcionan de manera óptima, se identifican cuales son los módulos que tienen más sobrecalentamiento, al igual que en el plano I se observa que la zona cercana al piso se conserva a baja temperatura.

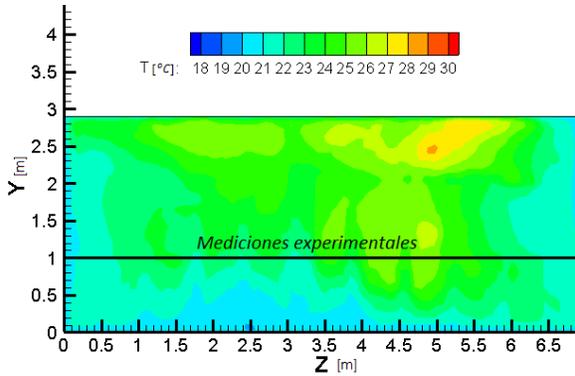


Figura 3.9: plano frontal

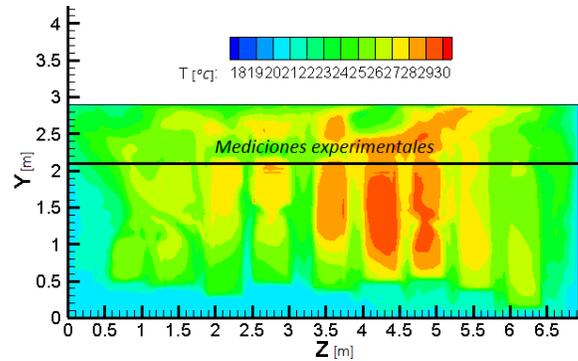


Figura 3.10: plano posterior

De los planos seleccionados se obtuvieron las temperaturas cercanas a cada módulo y se compararon con las mediciones iniciales ver la [Figura 3.11](#) donde se muestra la gráfica de la comparación de las temperaturas en la parte frontal de los equipos y en la [Figura 3.12](#) mediciones de la parte trasera de los equipos.

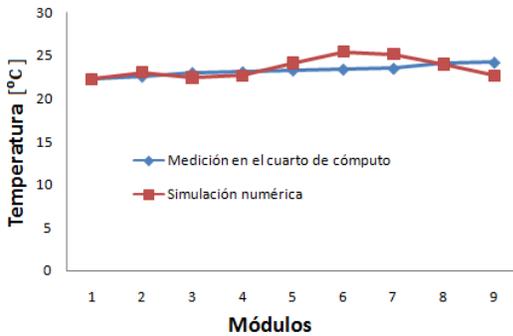


Figura 3.11: Gráfica de comparación de las temperaturas en el plano frontal

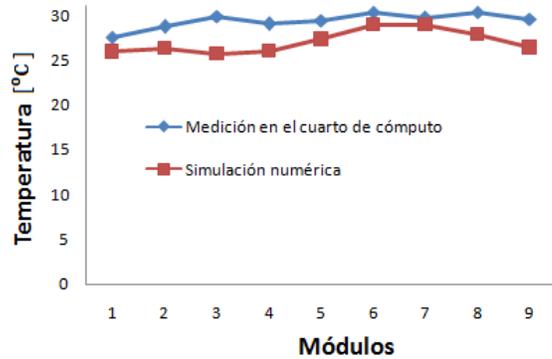


Figura 3.12: Gráfica de comparación de las temperaturas en el plano posterior

En las gráficas mostradas es posible apreciar la semejanza y tendencia de las temperaturas medidas en el cuarto de cómputo con las obtenidas mediante la simulación numérica. Se obtuvo un porcentaje de 13% de error, esto es el más elevado y solo se obtuvo en una comparación, las demás comparaciones que se hicieron presentan un porcentaje de error menor.

Para verificar que las velocidades del aire en la inyección, entre los equipos de cómputo y en los extractores sean las medidas en el cuarto de cómputo y consideradas en las condiciones para la simulación, se extrajeron los planos mostrados en la [Figura 3.13](#) en los que se muestran zonas con los diferentes valores de velocidad generados en la simulación. En el plano de la izquierda se muestran los valores de velocidad en la componente u, se puede identificar que el valor de las velocidades en la zona donde se encuentra el extractor equivalen al valor considerado de $1,5m/s$, de igual forma se puede ver que en el módulo la velocidad permanece constante con un valor de $0,5m/s$, puesto como condición. El plano ubicado a la derecha de la [Figura 3.13](#) se muestra con el fin de comprobar que la velocidad en la zona de inyección es la puesta como condición, este hecho se corrobora ya que la zona de velocidad creada tiene valores de $2m/s$, con lo cual se verifica que las velocidades del aire son las consideradas.

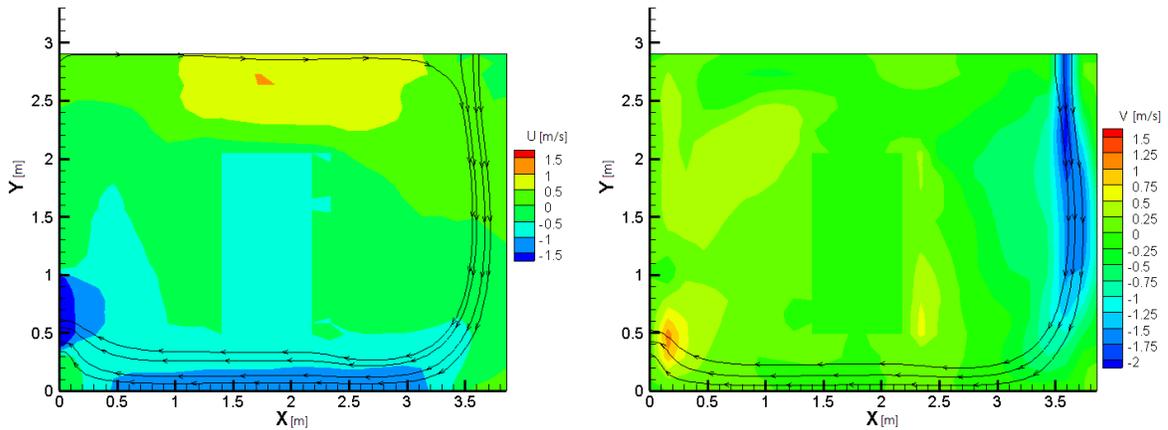


Figura 3.13: Planos seleccionados para realizar la verificación de las velocidades en la simulación.

3.2.1. Causas del sobrecalentamiento

Para determinar las causas de que no se produzca un buen enfriamiento de los equipos de cómputo, se hizo uso de la simulación, en la cual se analizó la trayectoria que sigue el aire y los campos de temperatura presentes, para identificar las zonas en las cuales se tiene mayor cantidad de aire con una elevada temperatura y poder identificar los factores que ocasionan tal fenómeno, para así poder proponer algunas soluciones, en la [Figura 3.14](#) se pueden observar la inyección de aire a baja temperatura y las regiones que presentan mayor temperatura dentro del cuarto.

Otro fenómeno que es detectado, es que en la parte alta del clúster se genera una recirculación esta es debido a que la densidad del aire caliente es menor que la del aire frío, lo que produce que suba y jamás se mezcle con el aire frío, que tiene mayor densidad, que baja a ras del suelo.

Una vez que se identificó la zona en la cual se tiene mayor temperatura se extrajeron algunos planos para su análisis, en la [Figura 3.16](#) se tiene un plano de la vista superior del cuarto, en donde se puede apreciar la zona de inyección de aire, de igual manera se observa la zona en la cual se tiene mayor temperatura y se identifican los módulos que se ven más afectados. Posteriormente se analizó un plano lateral en la [Figura 3.17](#) en donde se encuentra la zona de mayor temperatura, en el cual se distinguen varias zonas de temperatura en las que destacan una zona caliente y una más fría, se observa que la zona de temperatura baja es proveniente de la parte en la que se tiene la inyección, en esa zona se graficaron

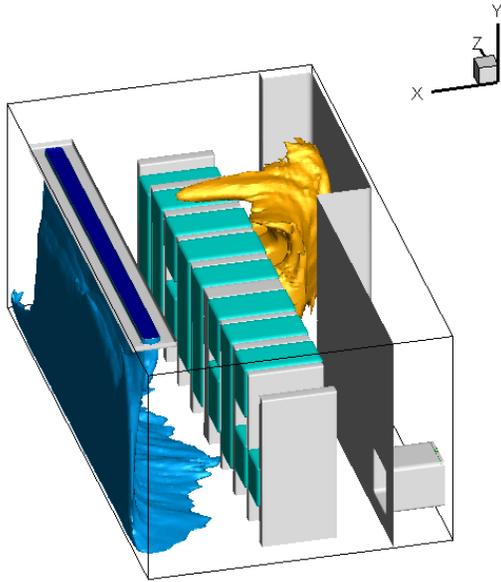


Figura 3.14: En esta figura se observa la inyección de aire a baja temperatura, al igual es visible la zona en la cual se tiene una mayor temperatura dentro del cuarto.

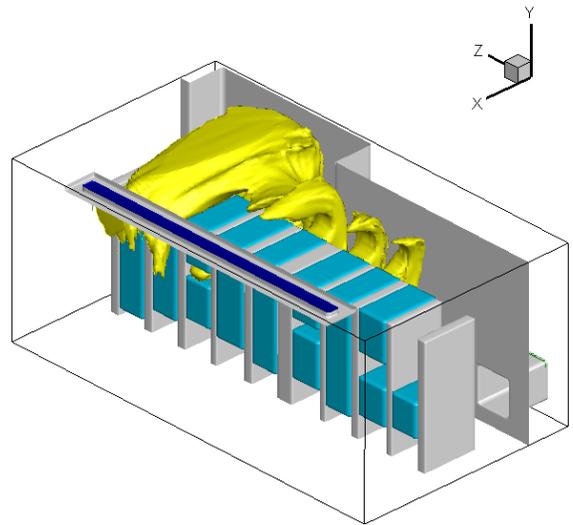


Figura 3.15: En esta figura se observa que se tiene flujo de aire caliente hacia la parte frontal del clúster.

algunos vectores de velocidad para poder ver la trayectoria del aire, con lo cual se puede observar que una parte del aire que es inyectado pasa por debajo del clúster sin tener contacto con los equipos de cómputo, esto se identificó como una causa del mal funcionamiento del sistema de aire acondicionado, lo anterior se observa en la [Figura 3.18](#).

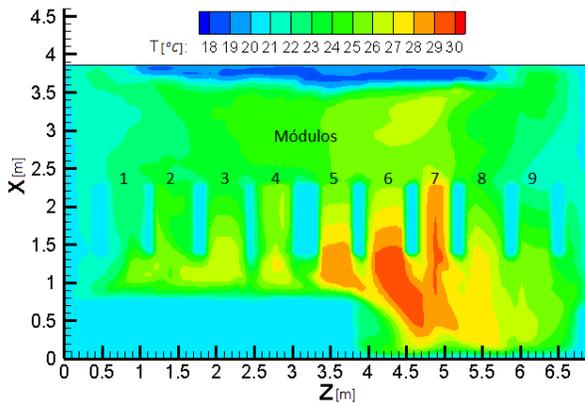


Figura 3.16: Plano extraído de la parte superior del cuarto, en el que se observa los módulos que presentan una mayor temperatura.

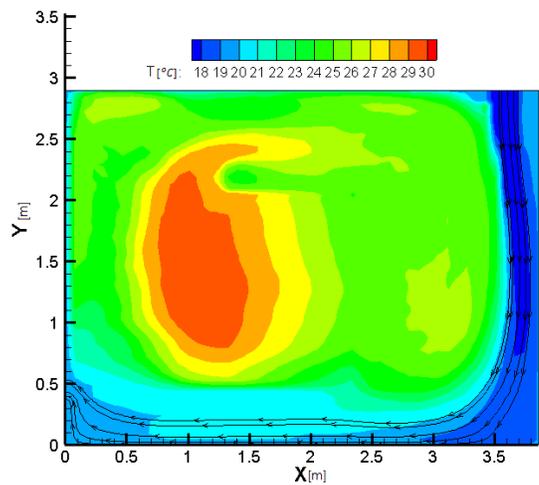


Figura 3.17: Plano extraído de la parte lateral, en el que se observa la trayectoria del aire que es inyectado.

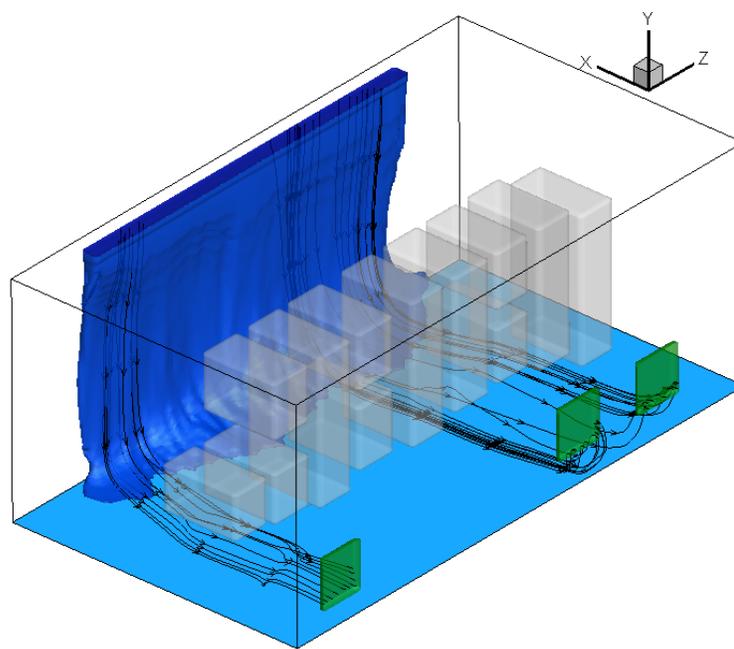


Figura 3.18: Se observa cómo es que fluye una cantidad de aire por debajo del clúster y es extraído sin tener contacto con los equipos.

Capítulo 4

Propuestas de solución

En este capítulo se plantearán algunas propuestas y modificaciones para la solución del problema de sobrecalentamiento presente en el cuarto de cómputo, las propuestas son creadas considerando los factores detectados que causan un bajo desempeño del sistema de enfriamiento, además de que se tomara en cuenta las restricciones que se tiene dentro del cuarto para hacer modificaciones.

4.1. Primer propuesta:

En esta opción se conserva la configuración inicial del cuarto, partiendo de lo observado en el plano mostrado en la [Figura 3.17](#), en donde se detecta que una parte del aire inyectado pasa por la parte baja del clúster y llega al extractor sin tener contacto con los equipos de cómputo, este efecto ocurre de la misma forma en los tres extractores como se puede ver en la [Figura 3.18](#), se propone agregar un bloqueo en la parte baja del clúster con lo cual se pretende evitar que el aire inyectado pase por esta zona y sea forzado a pasar por los equipos, en la [Figura 4.1](#) se observa el bloqueo propuesto.

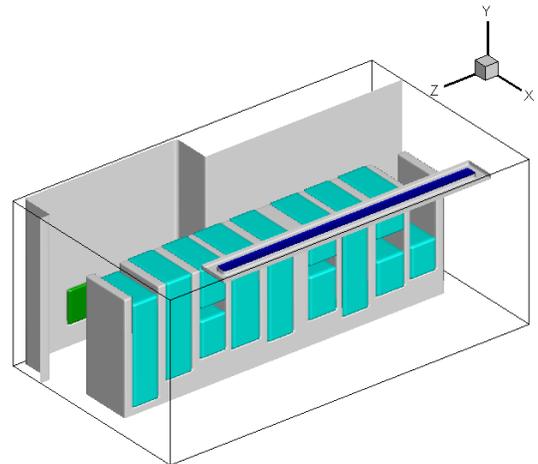


Figura 4.1: Configuración propuesta 1

4.2. Propuesta 2:

En esta propuesta se conserva el bloqueo de la parte baja del clúster de la primer propuesta, se agrega una modificación en la ubicación de los extractores, se decide colocarlos a una mayor altura en la pared del cuarto, con lo que se pretende extraer el aire caliente que se acumula en esa zona del cuarto, el fenómeno de acumulación de aire caliente se detectó en el plano de la [Figura 3.17](#), la nueva ubicación de los extractores se muestra en la [Figura 4.2](#).

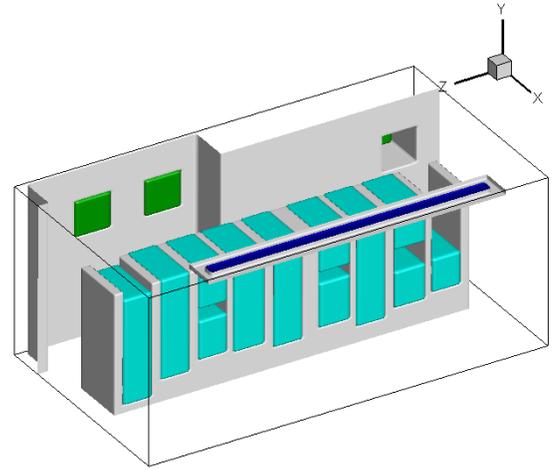


Figura 4.2: Configuración propuesta 2

4.3. Propuesta 3:

En la [Figura 4.3](#) se observa la configuración de la propuesta 3, la cual consiste en bloquear la parte baja del clúster como en la primera propuesta, se agregan bloqueos a los módulos en donde no hay componentes y a la parte superior del clúster, de igual forma se bloquean los pasillos laterales, la finalidad de los bloqueos es evitar la recirculación del aire en la parte superior del clúster lo cual se observó en la [Figura 3.17](#), de igual forma se pretende evitar el flujo de aire por los pasillos laterales, de forma general se espera que esta configuración provoque que el aire tenga que pasar por los equipos para llegar a la parte posterior del cuarto.

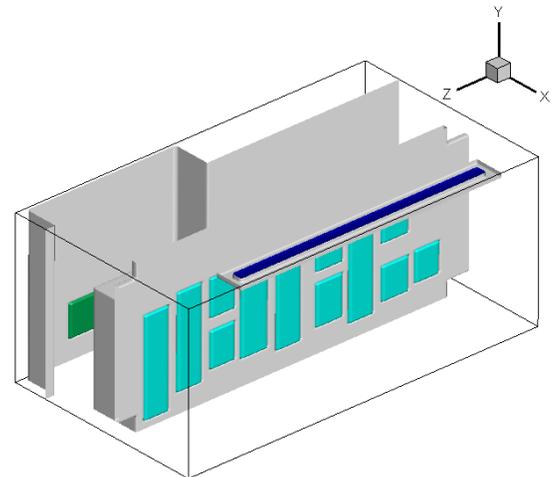


Figura 4.3: Configuración propuesta 3

4.4. Propuesta 4:

Para esta propuesta se conservaron los bloqueos de los pasillos, módulos, parte alta y baja del clúster, se agrega una modificación en la ubicación de la inyección del aire, en la [Figura 4.4](#) se observa que la inyección de aire se encuentra más cerca del clúster, lo cual se basa en el plano mostrado en la [Figura 3.17](#) y en la [Figura 3.14](#) en donde se observa que el aire inyectado se desplaza sobre la pared cercana, con el cambio de ubicación se pretende favorecer el flujo de aire entre los componentes que se encuentran en la parte alta del clúster, con lo que se aumentaría la transferencia de calor entre el aire y los componentes.

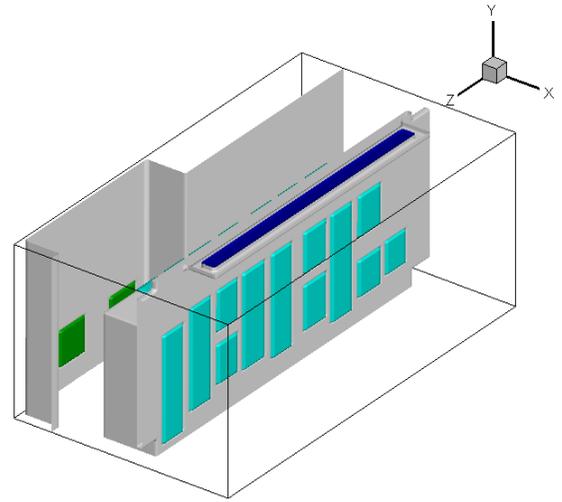


Figura 4.4: Configuración propuesta 4

4.5. Propuesta 5:

Como se muestra en la [Figura 4.5](#) en esta propuesta se mantiene la configuración de la propuesta 4 más la modificación de la ubicación de los extractores de aire, esta configuración incluye todas las modificaciones empleadas en las propuestas anteriores, la modificación en la ubicación de los extractores se hace a mayor altura que en la propuesta 2 con el objetivo de que no concentre aire caliente en esa zona.

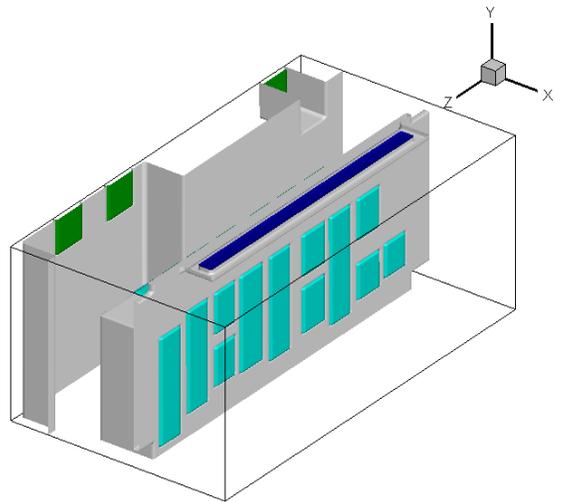


Figura 4.5: Configuración propuesta 5

Capítulo 5

Resultados de las propuestas consideradas

En este capítulo se presentaran los resultados generados en la simulación de cada una de las propuestas expuestas en el capítulo anterior, dichos resultados se analizarán además de que se compararán entre ellos, además se hará uso de los resultados generados en la simulación de la configuración inicial de los componentes dentro del cuarto para comparaciones. Algo necesario de mencionar es que para la simulación de todas las propuestas se hizo uso de las condiciones iniciales y de frontera usadas para la representación del estado inicial, además cada simulación se dejó correr hasta que alcanzara un estado permanente para evitar obtener resultados en la etapa de transición.

Antes de comenzar con las comparaciones entre las propuestas se harán visualizaciones de los efectos ocasionados por las modificaciones de cada propuesta.

Propuesta 1

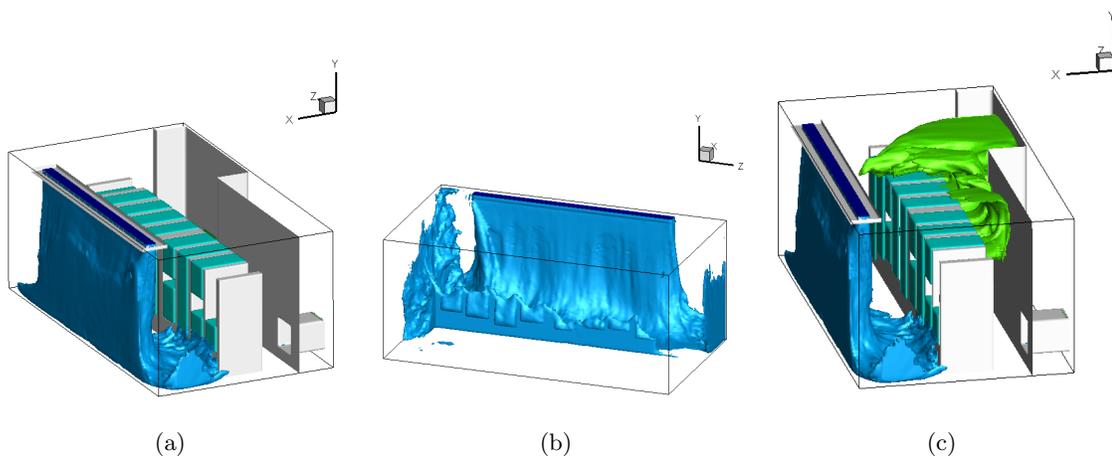


Figura 5.1: Resultados propuesta 1

El efecto producido al bloquear la parte baja del clúster es el esperado, como es visible en la [Figura 5.1\(a\)](#) el bloqueo impide que el aire fluya por la parte baja del clúster, lo cual es más evidente en la [Figura](#)

5.1(b) en la cual solo se muestra el aire y se observa el efecto del bloqueo, en la [Figura 5.1\(c\)](#) se puede observar que se sigue teniendo flujo de aire caliente hacia la parte frontal, además de que en las figuras mencionadas se observa que existe flujo de aire por los pasillos laterales.

Propuesta 2

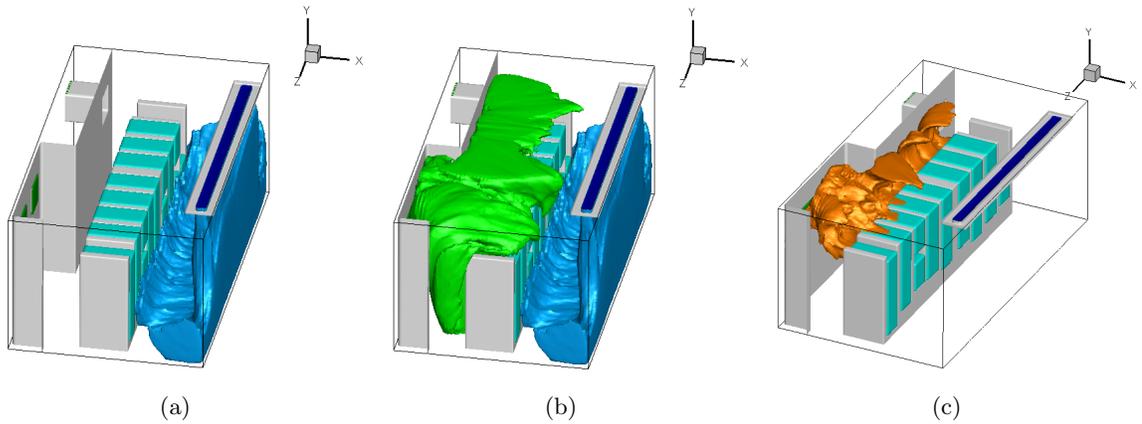


Figura 5.2: Resultados propuesta 2

En esta propuesta se observa el mismo efecto generado en la propuesta 1 por el bloqueo de la parte baja del clúster (ver [Figura 5.2\(a\)](#)), la nueva ubicación de los extractores promueve la extracción del aire caliente que se acumula en la parte alta del cuarto esto se puede ver en la [Figura 5.2\(c\)](#), las modificaciones de esta propuesta promueven el contacto del aire con los equipos y la extracción del aire caliente, en la [Figura 5.2\(b\)](#) se detecta que aun se tiene flujo de aire caliente hacia la parte frontal lo cual hace que el aire pase mas de una vez por los equipos y se produzca sobrecalentamiento.

Propuesta 3

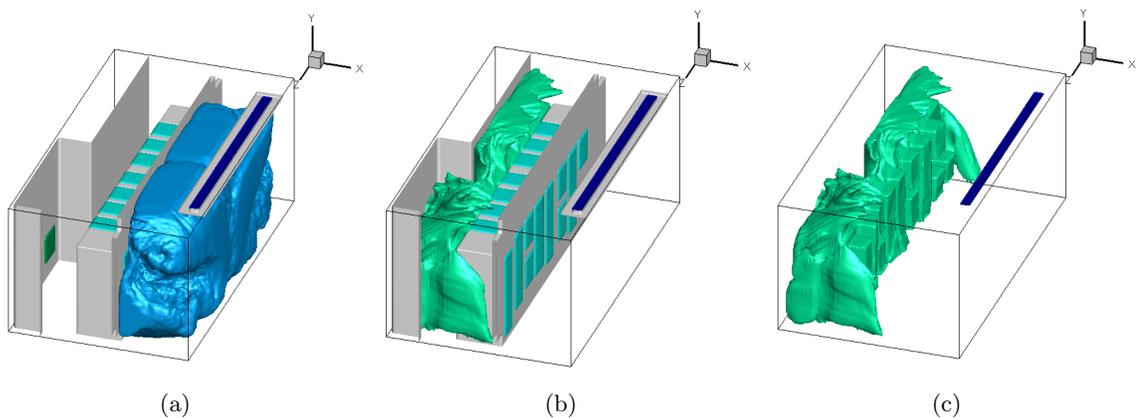


Figura 5.3: Resultados propuesta 3

Los resultados de esta propuesta son los esperados ya que los bloqueos agregados evitan el flujo de aire caliente hacia la parte frontal, al igual se ocasiona que el aire inyectado no fluya por los pasillos laterales en [Figura 5.2\(b\)](#) se muestra como fluye el aire de la parte posterior hacia la parte alta del clúster

y a los pasillos laterales pero el bloqueo impide que el aire llegue a la parte frontal, en la [Figura 5.3\(a\)](#) se puede observar como es que el aire inyectado se acumula en la parte frontal del clúster, con lo que el único camino del aire es pasar por los equipos en la [Figura 5.3\(c\)](#) se puede ver como el aire adopta la forma de los equipos al pasar por ellos.

Propuesta 4

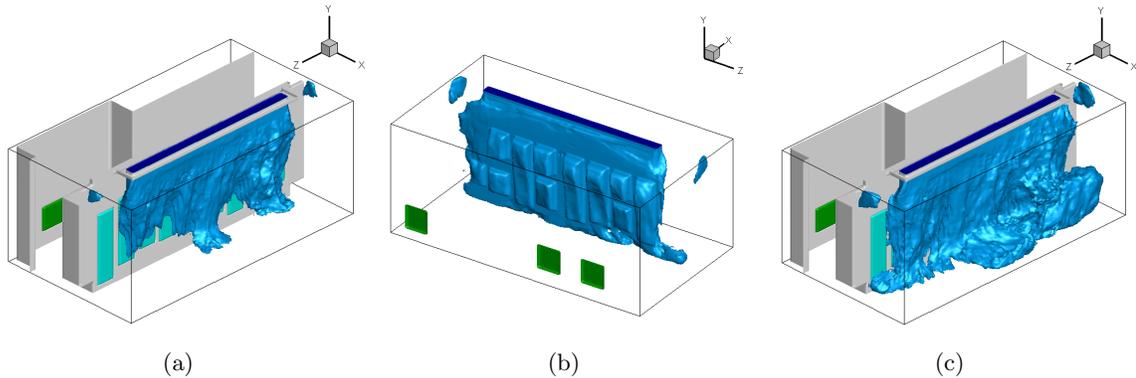


Figura 5.4: Resultados propuesta 4

El acercamiento de la inyección de aire al clúster ocasiona que el aire recién introducido al cuarto fluya por la superficie del clúster y los bloqueos en los extremos del clúster impiden el flujo de aire hacia la parte trasera como se puede ver en la [Figura 5.4\(a\)](#), otro efecto es que los componentes tienen contacto con aire a menor temperatura en la [Figura 5.4\(b\)](#) se muestra como es que el aire adopta la forma de los módulos antes de llegar al piso, en estos primeros resultados se detectó que el aire inyectado tiene menor contacto con el módulo 9 ya que como se puede observar en la [Figura 5.4\(c\)](#) el módulo no tiene aire sobre su superficie.

Propuesta 5

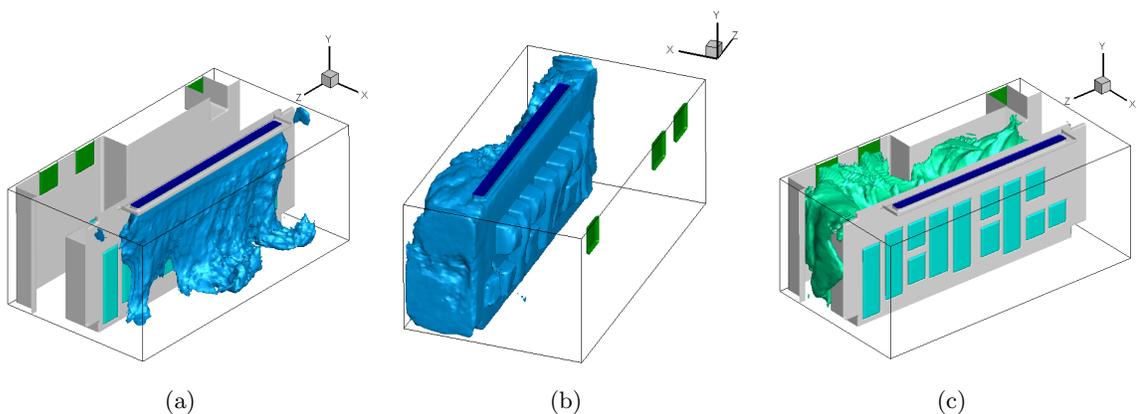


Figura 5.5: Resultados propuesta 5

Aun con la modificación en la ubicación de los extractores de aire, los efectos de esta propuesta son muy similares con los de la propuesta 4 en las [Figuras 5.5\(a\)](#) y [\(b\)](#), se puede observar la similitud

de los efectos en la parte frontal del clúster, en la parte posterior (ver [Figura 5.5\(c\)](#)), se puede observar a groso modo que no hay acumulación de aire caliente en la parte alta del cuarto, posteriormente se espera identificar que efecto tiene la nueva ubicación de los extractores ya que en esta parte solo tubo el fin de mostrar las primeras visualizaciones de los resultados generados.

5.1. Comparativa de los planos frontales

Uno de los modos que usará para identificar la mejor configuración es la comparación de planos extraídos de las simulaciones, los planos serán de la misma ubicación en cada configuración propuesta, además de ser comparados entre ellos se tomaran como referencia planos y datos de la simulación del estado inicial del cuarto de cómputo. Como primera comparación se comparan planos de la parte frontal del clúster, para facilitar hacer referencia a los resultados se hará uso de la siguiente nomenclatura:

$$P_n$$

donde : $P = Propuesta$
 $n = Numero$

Para poder realizar una comparación visual adecuada con los planos, seleccionados se decidió establecer un rango de temperaturas para todos los planos que serán mostrados, el cual es de $[18 - 30]^{\circ}C$ además de que en cada plano se graficará una tabla con el rango de valores y el color al cual corresponden, lo anterior es para que los tonos de color representen la misma temperatura en cada plano y así evitar confusiones o malas interpretaciones de las temperaturas presentes en los planos.

A simple vista cada una de las propuestas ocasiona un cierto cambio en las temperaturas del plano seleccionado, en el plano P1 ([Figura 5.6\(b\)](#)) el bloqueo ocasiona estancamiento de aire frío que se observa la generación de una zona fría cercana al piso, pero aun se pueden observar zonas que sobrepasan el rango de temperatura para el funcionamiento óptimo de los equipos, en el plano P2 ([Figura 5.6\(c\)](#)) se tienen más definidas las regiones de temperaturas y el cambio en la altura de los extractores reduce la temperatura de la parte alta del clúster.

En el plano P3 ([Figura 5.6\(d\)](#)) se tiene una mayor reducción de la temperatura comparado con los planos anteriores, lo cual es a consecuencia de tener bloqueos que impiden el flujo de aire caliente hacia enfrente, en los planos P4 ([Figura 5.6\(e\)](#)) y P5 ([Figura 5.6\(f\)](#)) el resultado es muy parecido, en donde las zonas de temperatura más baja son las que están bajo la zona de inyección de aire.

5.2. Temperaturas en la parte frontal

En los planos mostrados en la [Figura 5.6](#) hay una línea marcada a $1m$ de altura, al igual que en la configuración inicial se midieron las temperaturas de cada modulo, con las que se construyeron las gráficas de la [Figura 5.7](#) en las que se muestran las temperaturas de la configuración inicial comparadas con las dos primeras propuestas, en las cuales se observa reducción de la temperatura en esa zona, se

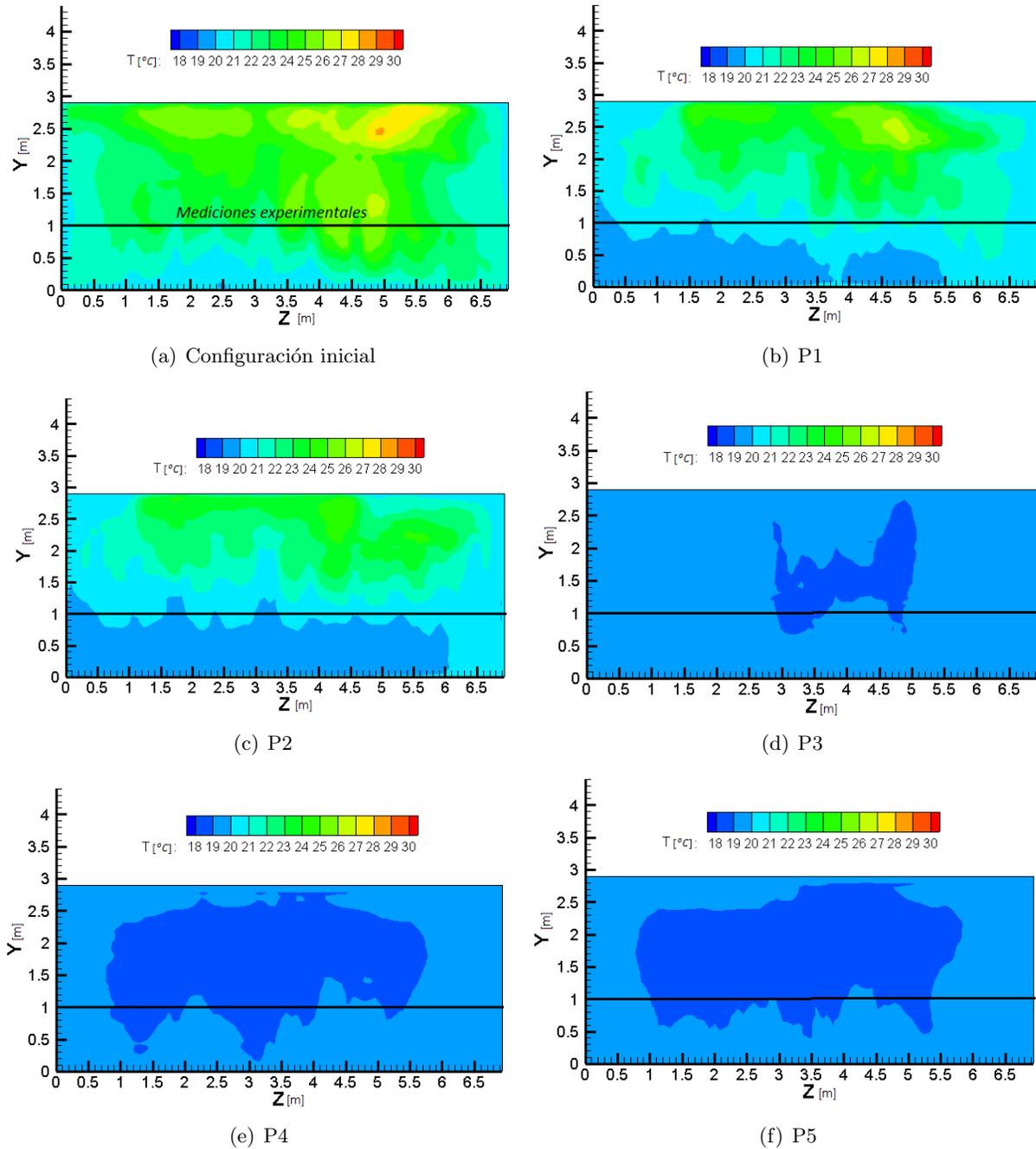


Figura 5.6: Resultados planos frontales configuración inicial y propuestas [1-5]

puede observar que las temperaturas entre las propuestas son muy similares.

De igual forma se generaron las gráficas de la [Figura 5.8](#), en las cuales se graficaron las temperaturas obtenidas de la configuración inicial comparada con las obtenidas de las propuestas 3, 4 y 5, la disminución de temperatura en la parte en la que se encuentran los primeros cuatro módulos es similar como en las temperaturas de las propuestas 1 y 2, en los módulos restantes se tiene una reducción de temperatura más notable ya que la temperatura se mantiene por debajo de los 20°C en todos los módulos, algo que

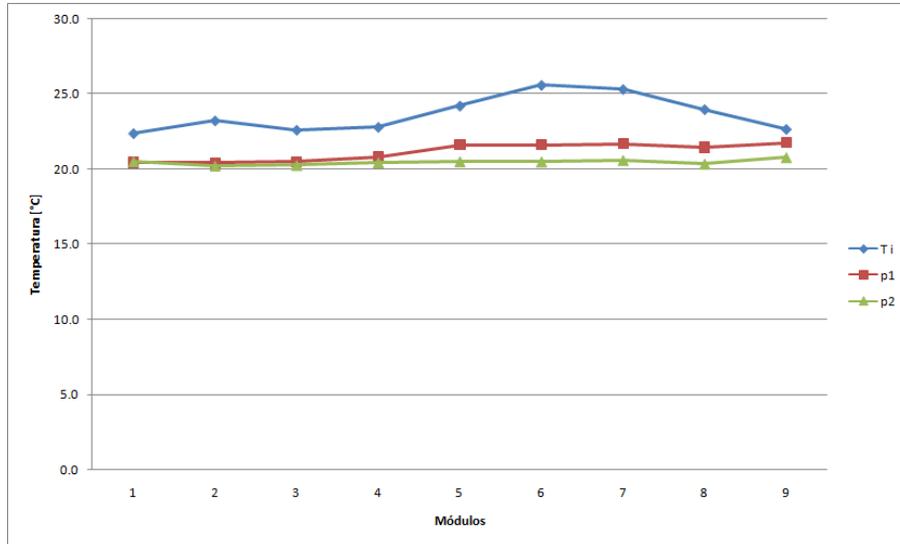


Figura 5.7: Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 1 y 2 comparadas con las temperaturas de la configuración inicial.

resulta evidente es que las temperaturas en los módulos 4 a 9 son prácticamente iguales aun que existe diferencia entre las configuraciones de las propuestas 3, 4 y 5.

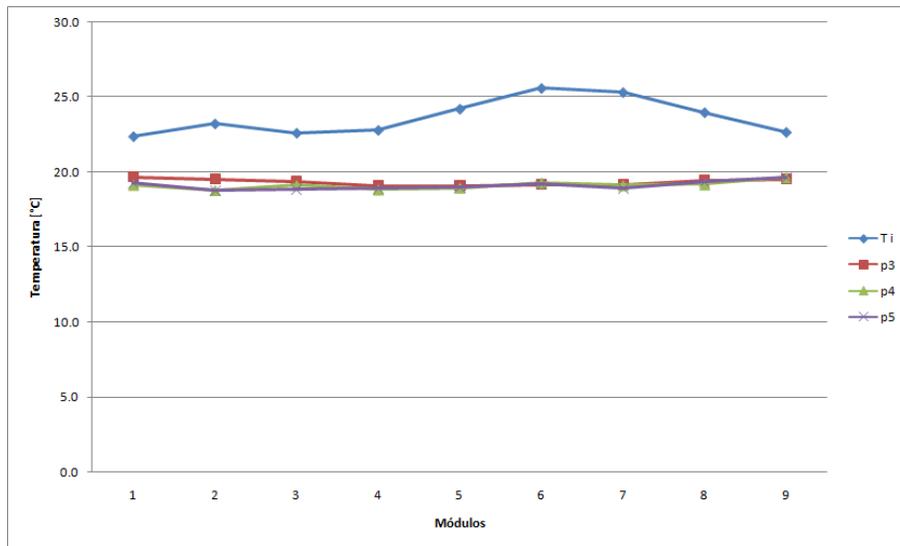


Figura 5.8: Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 3, 4 y 5 comparadas con las temperaturas de la configuración inicial.

5.3. Comparativa del flujo de aire a través del clúster

De la configuración inicial se extrajo el plano que se muestra en la [Figura 5.9\(a\)](#), del cual ya se habló con anterioridad, ahora se usará como referencia para identificar los efectos producidos por las

diferentes propuestas de solución, ya que en este plano se detectó una región con temperatura elevada y que el aire en esa parte no tiene contacto con los equipos de cómputo como ya se había mencionado con anterioridad. Los planos que se usaran para hacer las comparaciones fueron extraídos de cada una de las propuestas en la misma ubicación que el de la configuración inicial.

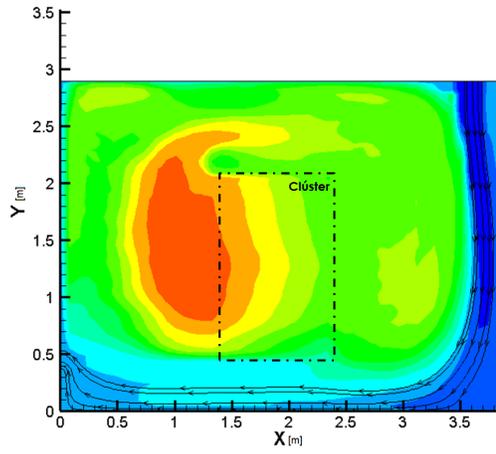
En la [Figura 5.9\(b\)](#) se muestra el plano extraído de la primer propuesta, en el que se observa que se consigue hacer que el aire no pase por debajo del clúster, al revisar el plano seleccionado se detectó que en la parte superior de la parte trasera se tiene una concentración de aire caliente como en la configuración inicial con la diferencia de que la temperatura es menor pero aun está por encima del rango de temperatura para los equipos de cómputo, además de que se sigue observando flujo de aire caliente hacia la parte frontal.

En la propuesta 2 el cambio en la ubicación de los extractores modifica la trayectoria del aire y se facilita la extracción del aire caliente que se tenía presente en la parte alta del cuarto en la configuración inicial, como se puede ver en la [Figura 5.9\(c\)](#) se graficaron algunas líneas de trayectoria que muestran como es que fluye el aire desde la zona de inyección hasta llegar al extractor pasando por los equipos, lo cual reduce el tamaño de la zona de aire caliente que se tenía presente, al igual se reduce notablemente la temperatura en comparación con el plano de la configuración inicial y el de la primer propuesta, pero la reducción no es la suficiente ya que aún se tienen presentes temperaturas elevadas que dificultan el buen funcionamiento de los equipos de cómputo.

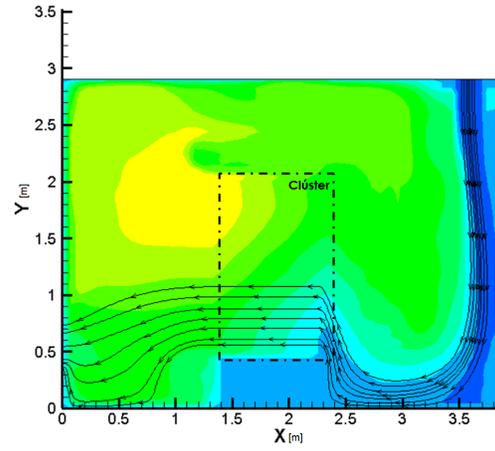
Los bloqueos creados en la propuesta 3 producen los efectos visibles en la [Figura 5.9\(d\)](#), como evitar la recirculación de aire caliente de la parte posterior hacia la parte frontal, otro efecto de los bloqueos es que en el pasillo en que se encuentra la inyección el aire frío, este se acumula para posteriormente ser forzado a pasar entre los equipos. Se puede observar que en esta propuesta ya no se tiene presente la zona de alta temperatura que se tenía en la configuración inicial y en los resultados de las propuestas 1 y 2, se graficaron algunas líneas de trayectoria mediante las que se puede observar que se tiene mayor interacción con los equipos, algo muy notable en el plano mostrado de esta propuesta es que las temperaturas resultantes no exceden el rango en el cual los equipos funcionan de forma adecuada.

En la [Figura 5.9\(e\)](#), se presenta un plano lateral extraído de la propuesta 4, en él se puede notar la mayor cercanía de la inyección de aire al clúster, esto por la zona de baja temperatura creada en la [Figura 5.9\(e\)](#), además de las líneas de trayectoria graficadas en el plano, se puede observar mediante las zonas de temperatura que los equipos ubicados en la parte alta del clúster son los que tienen mayor interacción con el aire inyectado, en este plano no se detectan temperaturas altas que dificulten el funcionamiento de los equipos.

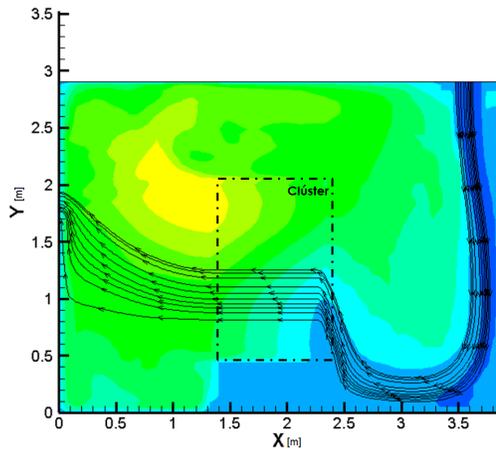
Las líneas de trayectoria graficadas en el plano que se muestra en la [Figura 5.9\(f\)](#) sirven para identificar el cambio en la ubicación de los extractores de la propuesta 5, puede notarse que el plano es muy similar con el de la propuesta 4, lo cual hace notar que el cambio en la ubicación de los extractores no produce cambios notables en comparación con la propuesta anterior.



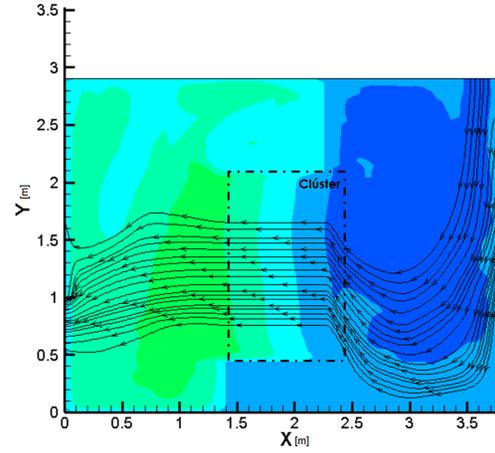
(a) Configuración inicial



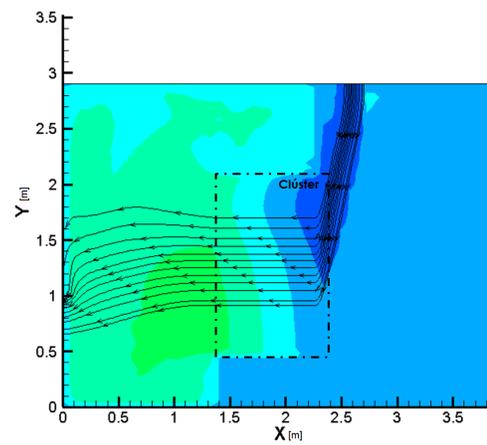
(b) P1



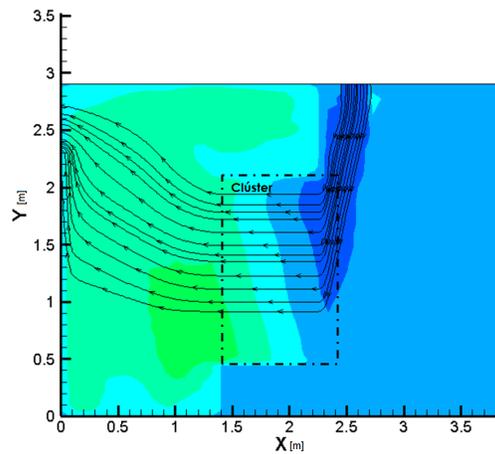
(c) P2



(d) P3



(e) P4



(f) P5

Figura 5.9: Resultados planos laterales configuración inicial y propuestas [1-5]

5.4. Comparativa de los planos de la parte posterior del clúster

Al analizar los resultados de la configuración inicial del cuarto, se detectó que en la parte posterior del clúster es la parte que presenta mayor problema de temperaturas elevadas, por lo cual se decidió extraer planos de cada propuesta para comparar los resultados generados, todos los planos en la misma ubicación que el plano de la configuración inicial, esta comparación de planos será la que más peso tenga para elegir la mejor propuesta para la solución del problema de sobrecalentamiento, ya que como se menciono anteriormente es la parte del cuarto que presenta mayor problema.

En la [Figura 5.10\(a\)](#) se muestra el plano posterior de la configuración inicial y en la [Figura 5.10\(b\)](#) el de la primer propuesta, en el plano de la primer propuesta se puede observar una reducción muy notable de las zonas en las cuales se tenía temperaturas elevadas, como consecuencia del bloqueo de la parte baja del clúster se elimina la zona de baja temperatura que se tenía cercana al piso, puede observarse que en los pasillos laterales se generan zonas con aire a baja temperatura, la reducción de temperatura en esta propuesta es muy evidente en comparación con la configuración inicial, pero no es suficiente ya que aun se tienen presentes zonas en las que la elevada temperatura podría afectar el rendimiento de los equipos.

En la [Figura 5.10\(c\)](#) se muestra el plano posterior generado en la simulación de la propuesta 2, en él se puede observar que el cambio en la ubicación de los extractores aumenta la extracción de aire caliente, lo que a su vez produce mayor reducción de temperatura en la parte alta del clúster, lo cual es la diferencia más notable en comparación con la primer propuesta ya que en general las zonas de temperaturas son muy similares y también se detecta que aun se tienen temperaturas elevadas. En la [Figura 5.10\(d\)](#) ahora se presenta el plano extraído de la propuesta 3, en el se puede observar en comparación con las propuestas anteriores una mayor reducción de temperatura, en este plano las temperaturas más elevadas se encuentran alrededor de los $23^{\circ}C$ lo cual no afecta el rendimiento de los equipos.

Al igual que en las propuestas anteriores se extrajeron los planos de las propuestas 4 ([Figura 5.10\(e\)](#)) y 5([Figura 5.10\(f\)](#)), en ambos planos se tienen presentes zonas de temperaturas muy similares aun cuando hay diferencias en las configuraciones, algo notable es que la reducción de temperatura llega a valores en los cuales se puede garantizar el funcionamiento adecuado de los equipos, una diferencia con el plano de la propuesta 3 es que se reduce la temperatura en las zonas que rodean el clúster.

5.5. Temperaturas en la parte posterior

Al igual que en los planos de la parte frontal, en los de la parte posterior se marco una línea a $2,1m$ de altura, a esa altura se extrajeron valores de temperatura de cada propuesta para ser comparados de manera puntual con los valores generados en la simulación de la configuración inicial, lo anterior se hace con el fin de visualizar de forma más cuantitativa los efectos producidos por la configuración de las propuestas.

Con los valores obtenidos de las propuestas 1 y 2 se crearon las gráficas de la [Figura 5.11](#), en donde se puede observar una reducción de temperatura similar en los primeros 3 módulos, en el resto de los módulos la propuesta 2 consigue una mayor reducción de la temperatura, aun cuando en ambas propuestas se hace evidente la reducción de temperatura, algunas de las temperaturas de la primer propuesta aun se consideran como inadecuadas para el funcionamiento de los equipos, con las temperaturas graficadas

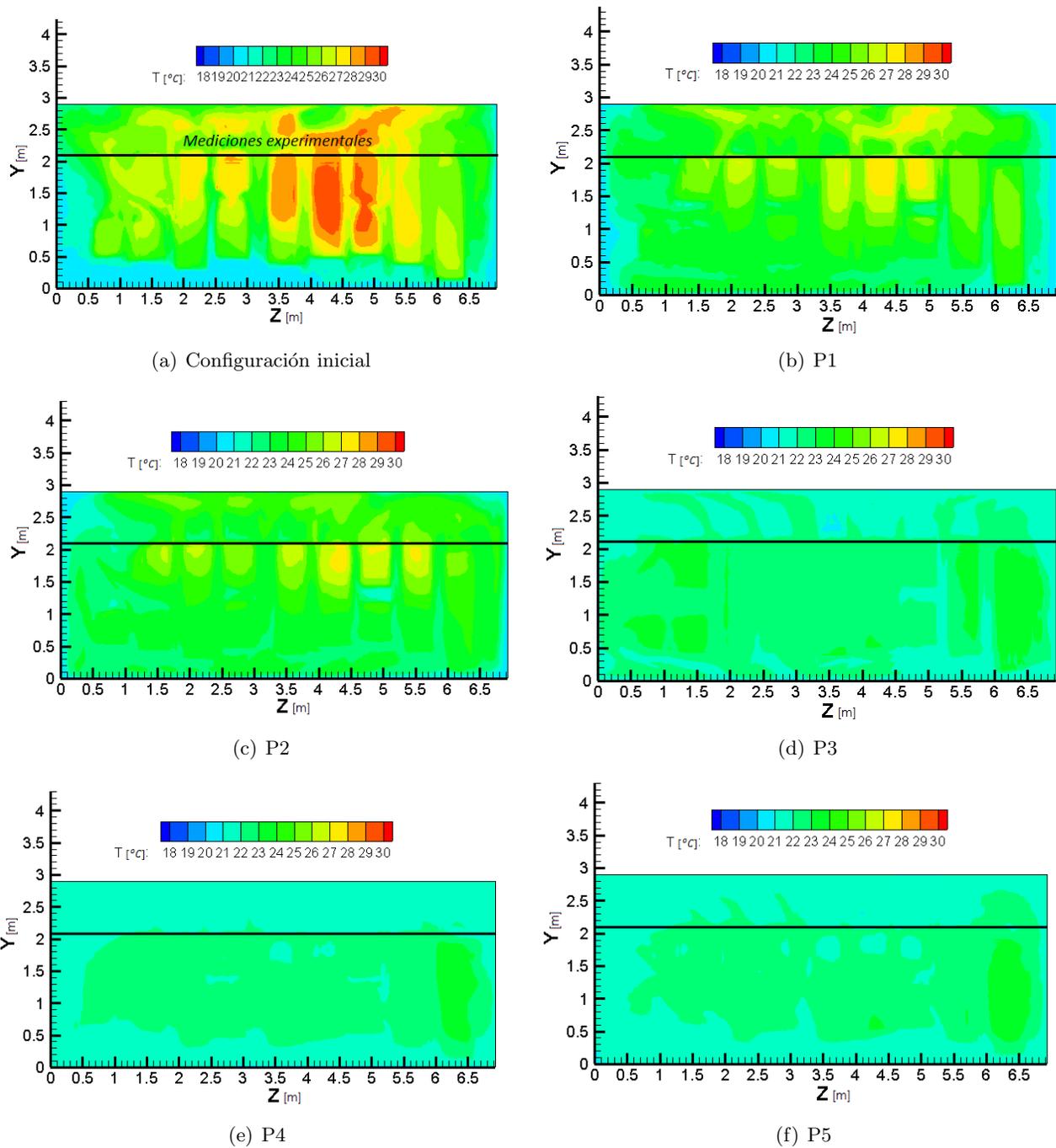


Figura 5.10: Resultados planos de la parte posterior configuración inicial y propuestas [1-5]

de la propuesta 2 se podría interpretar que es una solución adecuada lo cual sería un error ya que anteriormente se detectaron zonas con temperaturas más elevadas.

Con anterioridad se ha mencionado que los resultados de las propuestas 3, 4 y 5 son muy similares lo cual se refleja en las gráficas de la [Figura 5.12](#), en donde se graficaron los valores de temperatura obtenidos de la simulación de estas últimas propuestas, además de la gráfica de las temperaturas de la configuración

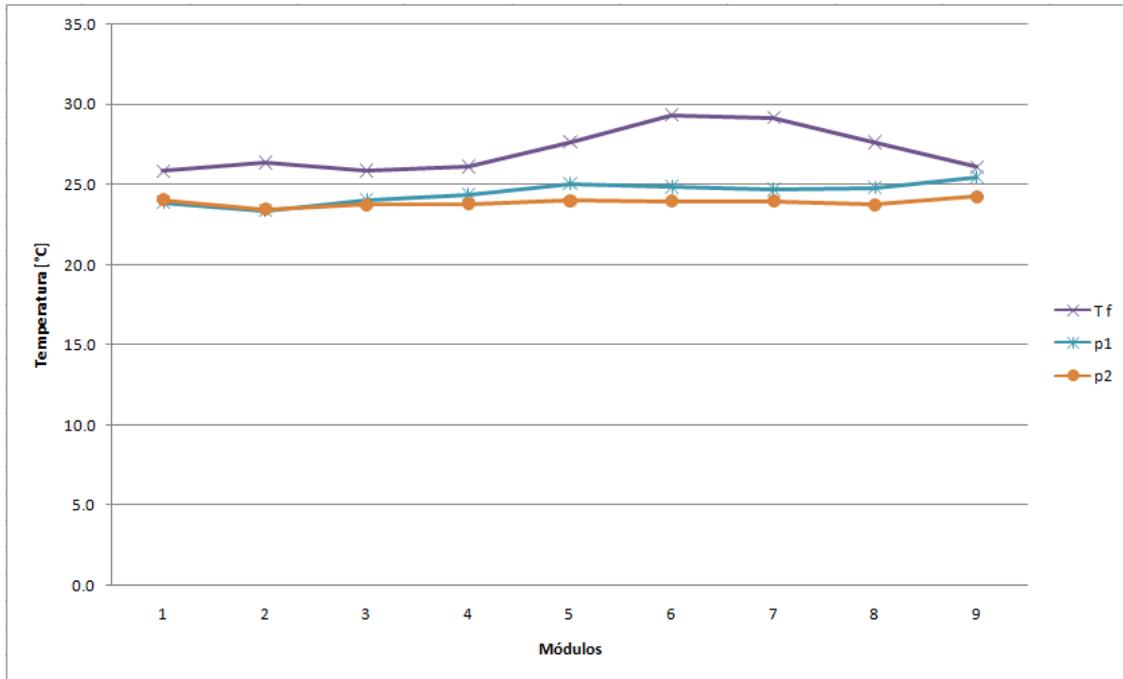


Figura 5.11: Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 1 (P1) y 2 (P2) comparadas con las temperaturas de la configuración inicial (Tf).

inicial, en las gráficas se puede notar que estas últimas propuestas logran mantener la temperatura dentro del rango en el que se puede garantizar el buen funcionamiento de los equipos, lo que hace más evidente la similitud de los resultados de estas propuestas es que las temperaturas extraídas de forma puntual en los módulos del 3 al 9 son prácticamente iguales en las tres propuestas.

5.6. Elección de la propuesta más adecuada

En esta parte del capítulo se definirá cual es la propuesta que genera los mejores resultados para la solución del problema de sobrecalentamiento en el clúster. El objetivo de las comparaciones realizadas anteriormente entre los resultados de cada una de las propuestas, es el de identificar qué efectos positivos se generan al interior del cuarto, de igual forma detectar en cuales configuraciones se sigue teniendo sobrecalentamiento en los equipos, si se diera el caso de que más de una propuesta pueda solucionar el problema, se tomarán otros factores para discriminar las propuestas como el hecho de que en algunas se tendría que realizar obra dentro del cuarto para cambiar la ubicación de algunos componentes.

En los resultados obtenidos de las propuestas 1 y 2 se puede observar que existe una reducción de temperatura muy evidente, en ambas propuestas se evita el flujo de aire en la parte baja del clúster, pero aun existen fenómenos que influyen en el sobrecalentamiento de los equipos, como la existencia de recirculación de aire en la parte alta del clúster, aun con el cambio de la ubicación de los extractores en la propuesta 2 se sigue teniendo recirculación, de igual forma en estas dos propuestas existe flujo de aire por los pasillos laterales, además de que se detectaron temperaturas elevadas que podrían ocasionar un rendimiento bajo en los equipos de cómputo, por tales motivos se decide descartar las propuestas 1 y 2

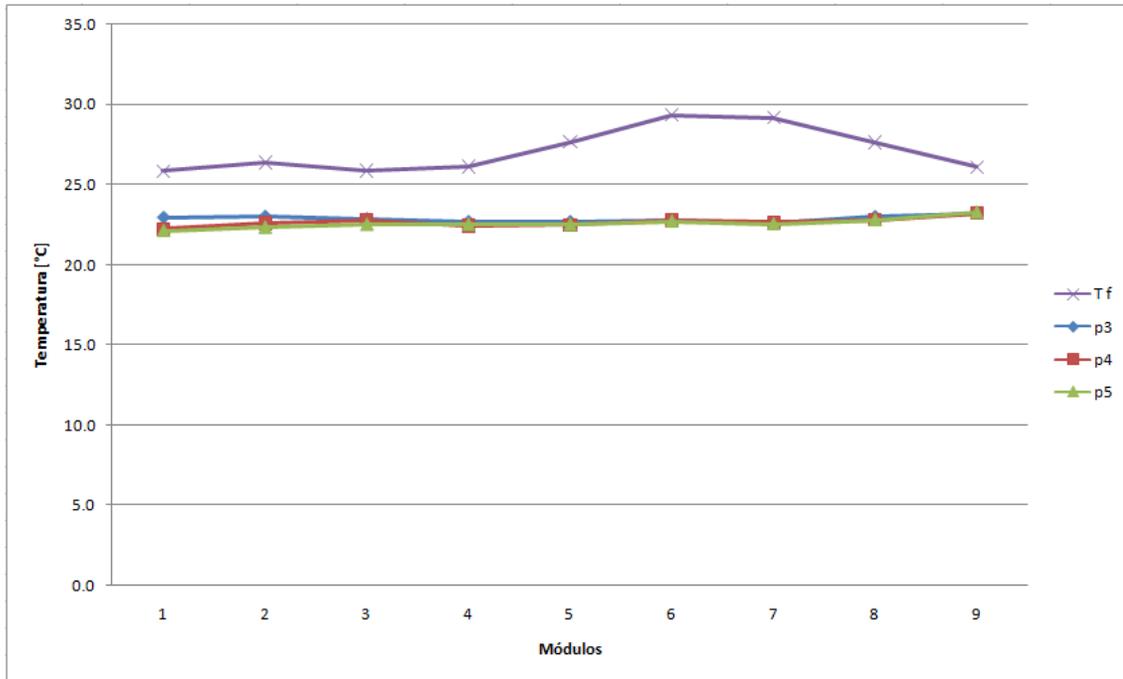


Figura 5.12: Gráfica de las temperaturas generadas por las propuestas 3 (P3), 4 (P4) y 5 (P5) comparadas con las temperaturas de la configuración inicial (Tf).

como una solución al sobrecalentamiento en el cuarto de cómputo.

Los resultados obtenidos de las propuestas 3, 4 y 5 son adecuados para la solución de sobrecalentamiento de los equipos, ya que al bloquear el flujo de aire por la parte baja, alta y los pasillos laterales del clúster, se evitan los flujos de aire frío sin que este tenga contacto con los equipos, al igual se evita la recirculación de aire caliente en la parte alta del clúster, con lo que el aire tiene que pasar por los equipos de cómputo para llegar a la parte posterior produciendo un mayor enfriamiento, en los planos frontales de estas propuestas se puede notar diferencia en las zonas de temperatura producidas en la propuesta 3, lo cual es a causa de que en las dos propuestas siguientes la inyección de aire se colocó más cerca del clúster, en términos generales las modificaciones de las propuestas 4 y 5 no generan gran variación en comparación con los resultados obtenidos en la tercer propuesta, además de que en estas últimas propuestas el cambio en la ubicación de la inyección de aire y de los extractores requieren de la realización de obras, lo que podría afectar el funcionamiento de los equipos a consecuencia de los trabajos necesarios, por estos motivos se decide descartar las propuestas 4 y 5.

Se elige la propuesta 3 como la más adecuada para solucionar el problema de sobrecalentamiento de los equipos, ya que de la simulación de ésta se obtienen resultados que logran mantener la temperatura de los equipos dentro del rango en el que se puede tener un funcionamiento adecuado, esta propuesta implica la entrada de personal para realizar los trabajos necesarios para la creación de los bloqueos, pero son considerados menores en comparación con los requeridos en las propuestas 4 y 5, además de que se propone crear el bloqueo con cortinas de material polimérico lo que permite el paso de personal en caso de ser necesario.

5.7. Revisión de la propuesta elegida

Siendo elegida la propuesta 3 como la más adecuada, se decidió realizar algunas comparaciones adicionales con los resultados de la configuración inicial y los de la propuesta 3, al igual se hará uso de datos obtenidos en el cuarto de cómputo, con lo cual se pretende confirmar que la propuesta elegida logra eliminar el sobrecalentamiento de los equipos y los puede mantener a una temperatura adecuada para su funcionamiento.

Una comparación realizada es con el plano de la configuración inicial que se usó para identificar qué módulos presentaban mayor sobrecalentamiento, para lo que se obtuvo un plano en la misma ubicación pero en la propuesta 3, los planos se muestran en la [Figura 5.13](#), en donde resulta muy evidente la reducción de temperatura y además se logra mantenerla dentro de valores adecuados para el funcionamiento de los equipos.

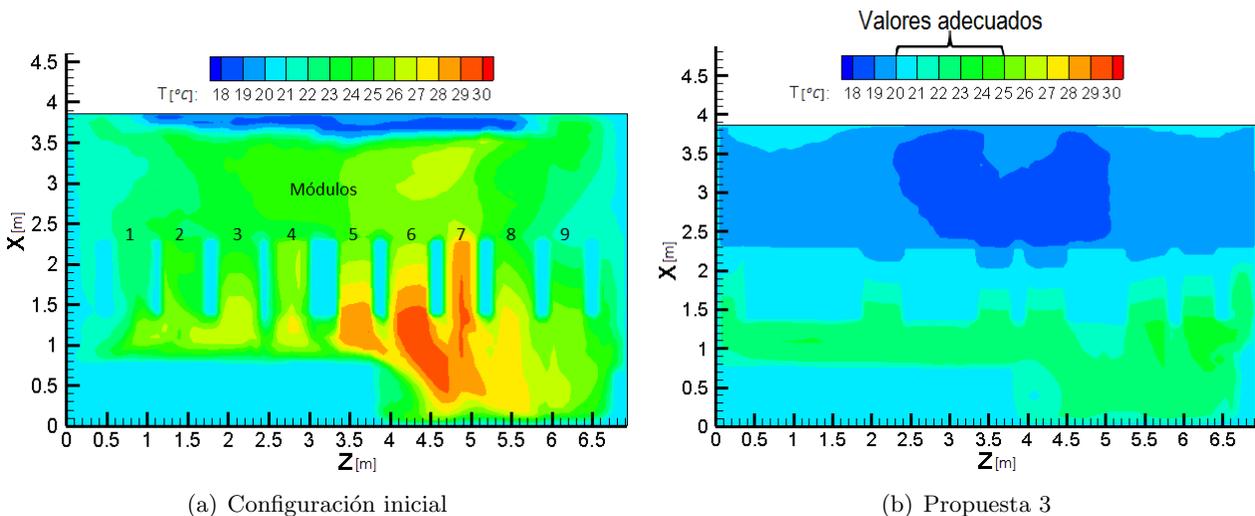


Figura 5.13: Planos en los que se muestra la reducción lograda con la configuración de la propuesta 3.

En las imágenes, planos y gráficas de la propuesta 3 usadas para la comparación de resultados no se detectaron temperaturas elevadas, en la [Figura 5.14](#) se muestra la propuesta 3 y en ella se graficaron las temperaturas más elevadas generadas en la simulación con el fin de identificar si se tienen temperaturas elevadas no detectadas en los módulos, en la imagen se detecta que las temperaturas más elevadas en los módulos de esta simulación se encuentran alrededor de los $23^\circ C$, con lo cual se comprueba que no existen temperaturas que puedan interpretarse como sobrecalentamiento de los equipos.

Como última comparación se decidió graficar los valores de temperatura medidos en la parte posterior del clúster junto con los generados en la simulación de la propuesta elegida para hacer notar la reducción que se podría tener con la aplicación de la propuesta. En la [Figura 5.15](#) se muestra la gráfica, en la cual se puede observar la amplia reducción de las temperaturas en la simulación lo que comprueba que esta es la solución más adecuada de las propuestas para solucionar el problema de sobrecalentamiento del clúster.

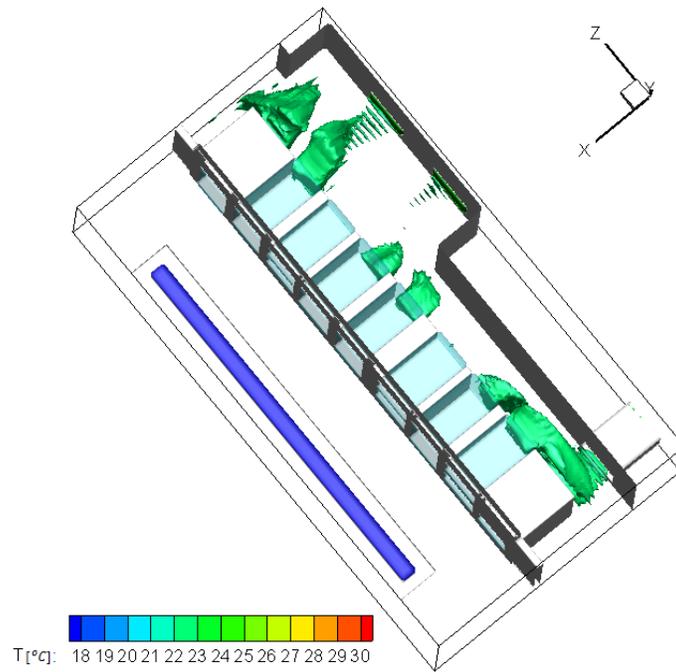


Figura 5.14: En esta imagen se muestran las temperaturas mas elevadas detectadas en los módulos de la propuesta 3

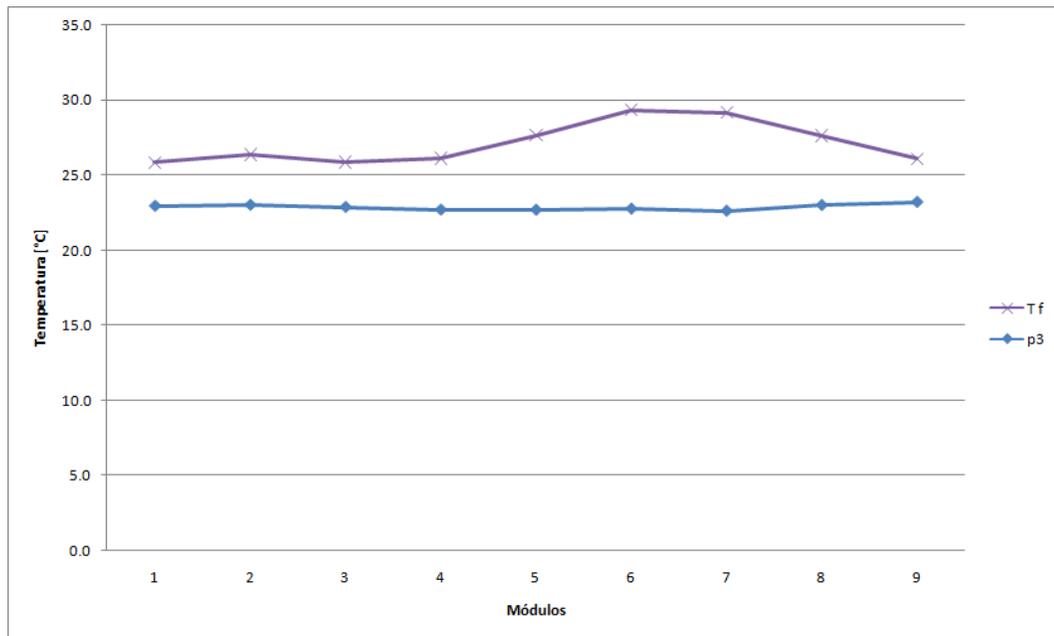


Figura 5.15: En esta gráfica se muestran los valores de temperatura obtenidos de la simulacion comparados con los medidos en el cuarto

5.8. Modificaciones a la propuesta elegida

Después de haber seleccionado la propuesta 3 como la más adecuada para solucionar el problema de sobrecalentamiento en los equipos de cómputo, se planteó realizar algunas modificaciones en los bloqueos de los pasillos laterales del clúster, las modificaciones consisten en hacer cortes en los bloqueos, el primer corte se hace a $2,1m$ que es la altura del clúster [Figura 5.16\(a\)](#) y el segundo con una altura de $1,0m$ [Figura 5.16\(b\)](#) ambos cortes parten del piso.

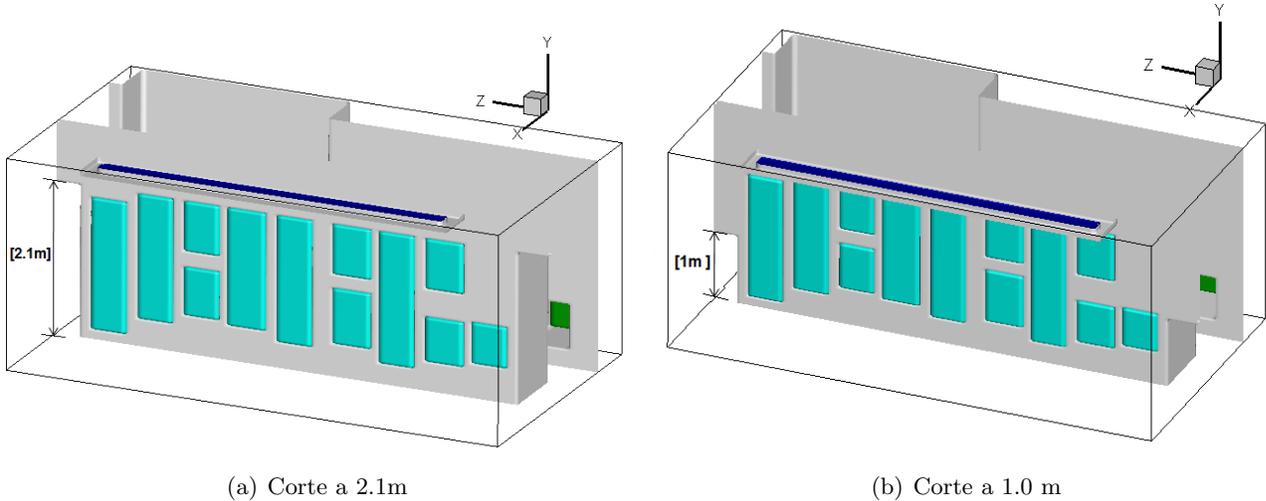


Figura 5.16: Modificaciones a la propuesta 3

Con los cortes propuestos se pretende hacer que una cantidad del aire inyectado a baja temperatura fluya por los pasillos laterales de forma que se mezcle con el aire de la parte posterior y se promueva la extracción del aire de esa zona.

Para la simulación de estas modificaciones se usaron las mismas condiciones de frontera y consideraciones empleadas en la simulación de la configuración inicial y de las 5 propuestas, sólo que para estas simulaciones se decidió reducir el valor de la temperatura a la cual se inyecta el aire, en lugar de usar el valor de $18^{\circ}C$ como en las simulaciones pasadas, para estas se usó un valor de $13^{\circ}C$, el motivo del cambio en la temperatura es que al existir una diferencia de temperatura mayor entre el aire de inyección y la temperatura a la cual se encuentran los equipos (en la configuración inicial) se producirá mayor transferencia de calor lo que a su vez generará un mejor enfriamiento de los equipos.

Al igual que en las simulaciones anteriores para poder obtener resultados, se mantuvieron activas las simulaciones de estas modificaciones hasta que llegaron a un estado permanente, en la [Figura 5.17](#) se muestran los primeros resultados de generados en la simulación de los cortes en las cortinas de los pasillos, en ambas modificaciones se puede observar un comportamiento del aire similar entre ellas, pero diferente en comparación con las simulaciones anteriores, el aire tiene un comportamiento más aleatorio, se puede deducir que el aire presenta mayor interacción con los equipos y el aire que se encuentran en el cuarto, con lo que se consigue un mejor enfriamiento.

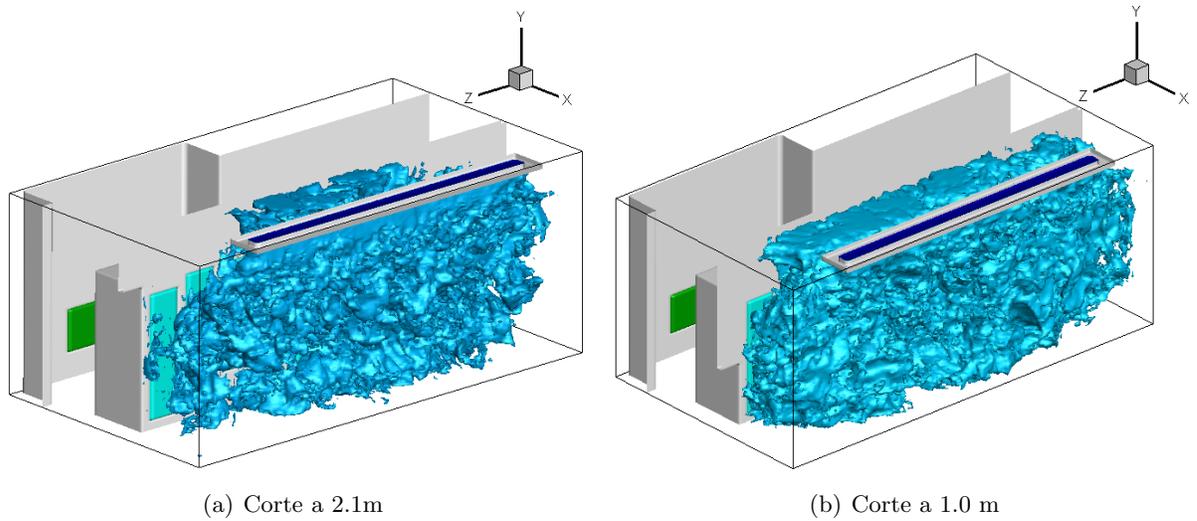


Figura 5.17: Comportamiento del aire inyectado

En una segunda observación de los resultados, se detectó que existe flujo de aire por los cortes realizados a los bloqueos de los pasillos laterales, en la [Figura 5.18](#) se puede observar el flujo de aire, lo esperado era que el aire fluyera hacia la parte posterior del clúster por los cortes en la cortina de los pasillos, pero el efecto generado en la simulación es contrario al esperado ya que en ambas modificaciones se tiene flujo de aire hacia la parte frontal del clúster, este efecto puede tener consecuencias desfavorables en el enfriamiento de los equipos, ya que se puede producir recalentamiento en el aire que fluye por los equipos de cómputo (por efecto de recirculación de aire en los equipos cercanos a los pasillos).

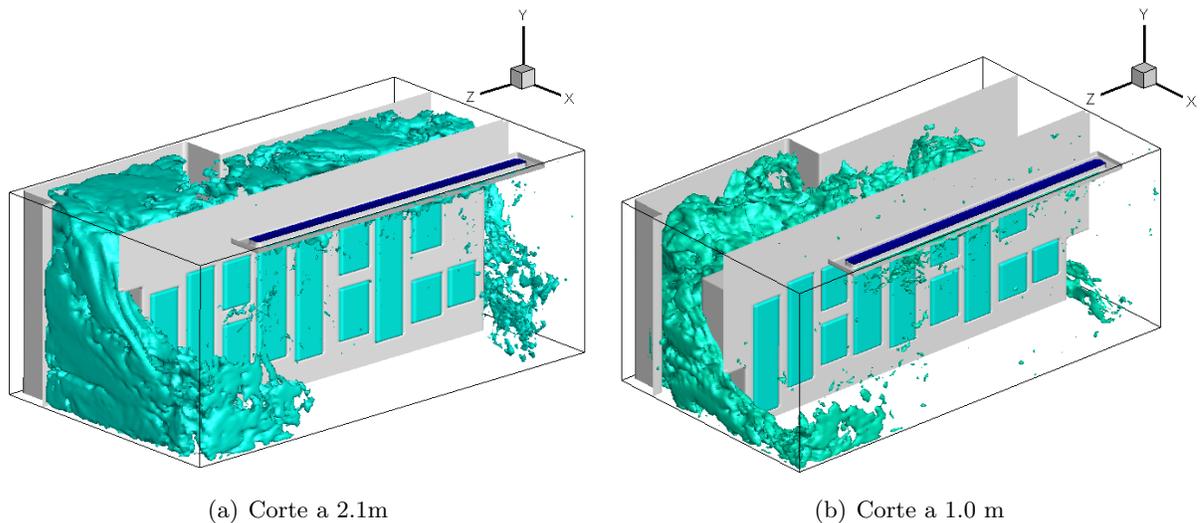


Figura 5.18: Flujo de aire por los cortes en el bloqueo

Para un análisis mas detallado de la simulación de las modificaciones, se extrajeron algunos planos para su análisis (la temperatura se estableció en un rango de $[13 - 30]^{\circ}C$). En la [Figura 5.19\(a\)](#) y [Figura 5.19\(b\)](#) se presentan los planos frontales de cada uno de los cortes, las temperaturas máximas detectadas

en ambos planos se encuentran alrededor de los $19^{\circ}C$, se detectó que las temperaturas más elevadas se encuentran en las zonas que se realizaron los cortes en los bloqueos de los pasillos, además se puede ver como se crean zonas en las paredes laterales con aire proveniente de la parte trasera del clúster (en ambos planos se observa el mismo efecto), pero en la zona que se encuentra frente al clúster las temperaturas son más bajas (entre 14 y $15^{\circ}C$).

En los planos de la parte posterior [Figura 5.19\(c\)](#) y [Figura 5.19\(d\)](#) las zonas de temperaturas se encuentran por debajo de los $20^{\circ}C$, algo que cabe destacar es que hay zonas en ambos planos con temperaturas cercanas a los $17^{\circ}C$ en mayor medida en el plano del corte a $1,0m$, estas temperaturas bajas se encuentran fuera del rango en el que se puede garantizar el buen funcionamiento de los equipos de cómputo, lo cual puede deberse a la temperatura a la que se inyecta el aire en estos casos.

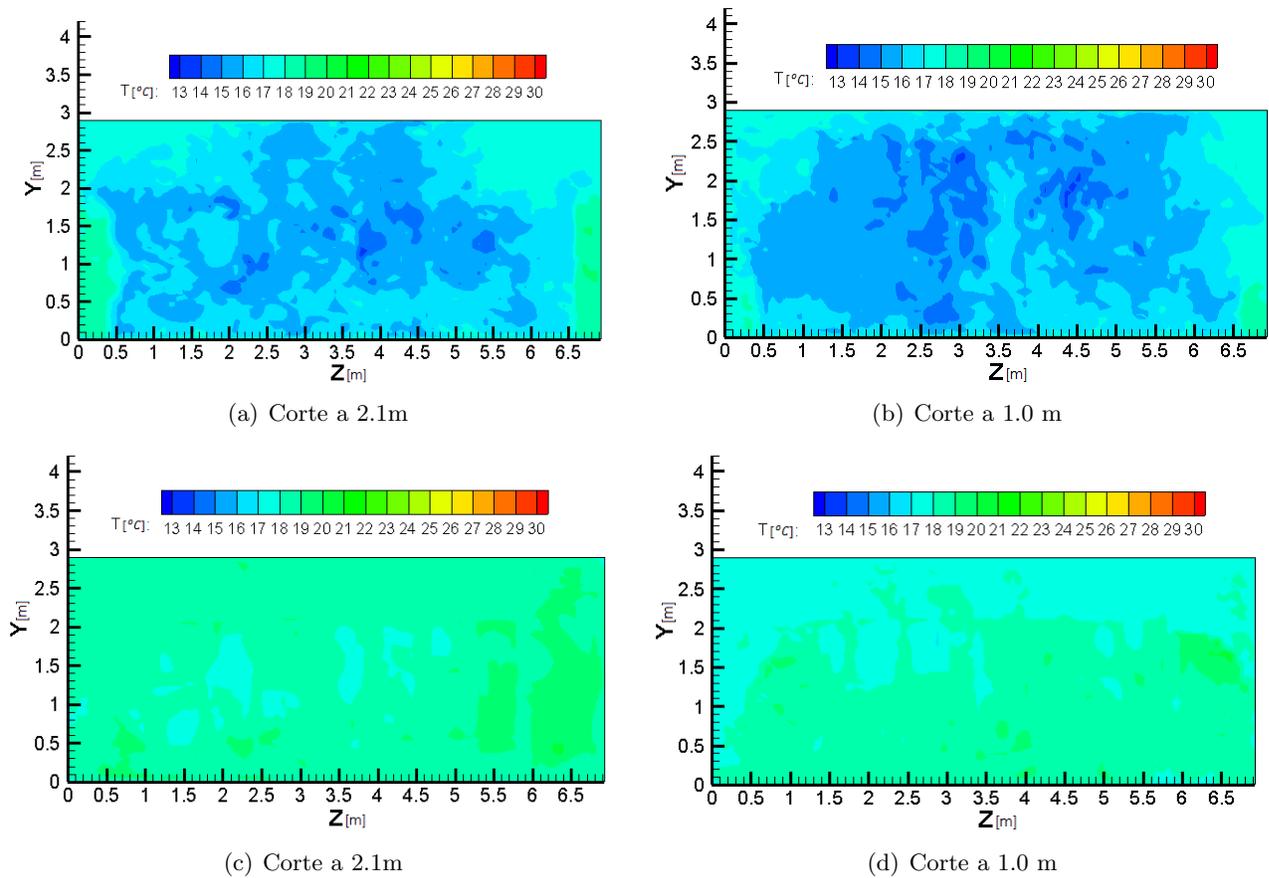
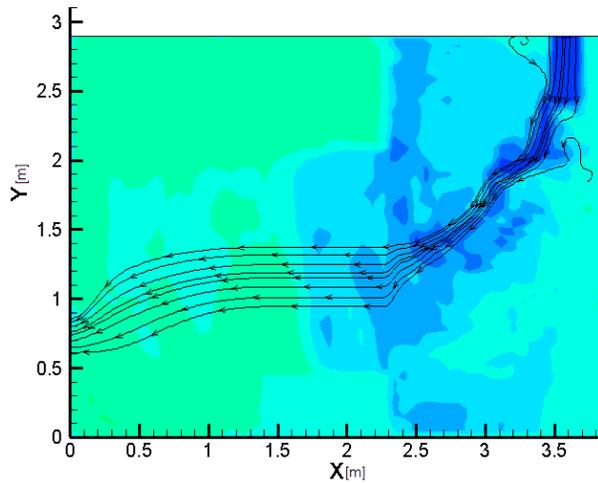


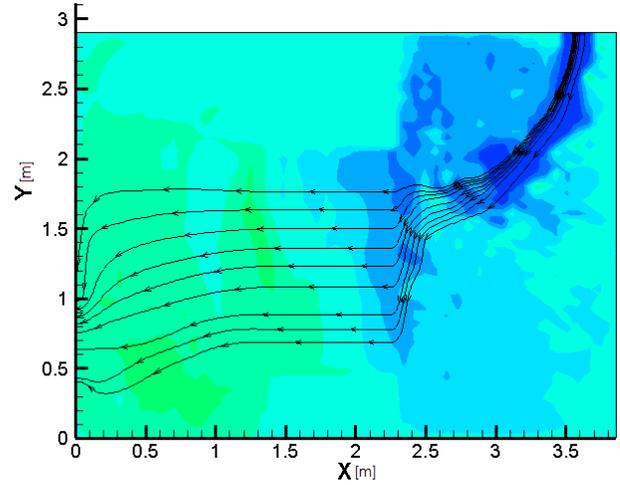
Figura 5.19: Planos frontales y posteriores generados por los cortes

Para conocer el comportamiento del aire dentro del cuarto y a través de los equipos de cómputo, se extrajeron planos de la sección transversal del clúster en ambas modificaciones, en la [Figura 5.20\(a\)](#) y [Figura 5.20\(b\)](#) se muestran los planos mencionados, en ellos se graficaron algunas líneas de trayectoria con las que se puede observar que una parte del aire inyectado tiene un comportamiento similar al detectado en las propuestas 4 y 5 (ver [Figura 5.9](#)) en donde se acerca la zona de inyección de aire al clúster, el plano del corte a $2,1m$ ([Figura 5.20\(a\)](#)) se observa una zona con aire a temperatura baja la mitad del clúster, de igual forma se puede observar una parte de los equipos a temperatura baja en el plano con el corte a

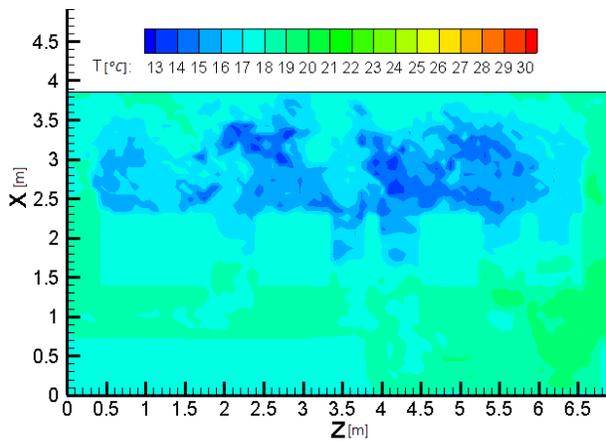
1,0m (Figura 5.20(b)). Se extrajeron planos de la sección transversal Figura 5.20(c) y Figura 5.20(d) del clúster en ambos planos se observa que en los equipos de cómputo fluye aire a baja temperatura, en el plano con el corte de 2,1m se puede ver como existe flujo de aire por los pasillos esto por la zona de aire que se forma cercana a las paredes del cuarto, mientras que en el plano del corte de 1,0m se presenta el mismo efecto pero en menor cantidad y se observa una zona de aire acumulándose en la parte frontal del clúster.



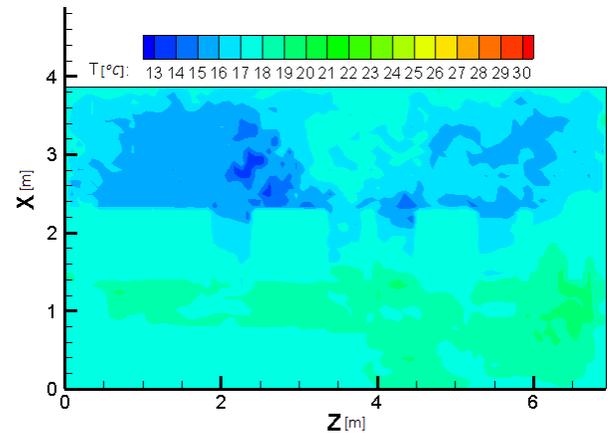
(a) Corte a 2.1m



(b) Corte a 1.0 m



(c) Corte a 2.1m



(d) Corte a 1.0 m

Figura 5.20: Planos laterales y transversales del clúster

En los planos mostrados en la Figura 5.20(c) y Figura 5.20(d) se puede ver que en general la temperatura de los equipos de cómputo no presentan problemas de sobrecalentamiento, las temperaturas a las que se encuentran están fuera del rango de $[20-25] ^\circ C$ en el que se puede tener un buen rendimiento, lo cual es debido en gran medida a la temperatura a la cual se decidió simular la inyección del aire.

5.8.1. Efectos producidos por los cortes en las cortinas de los pasillos laterales

Como se mencionó anteriormente los cortes en los bloqueos de los pasillos laterales y el uso de una temperatura más baja en el aire que se inyecta, en las simulaciones se obtienen comportamientos distintos en la distribución del aire inyectado en el cuarto, esto en comparación con las simulaciones anteriores, los equipos de cómputo se encuentran a temperaturas bajas lo cual puede deberse a la temperatura que se introduce el aire en conjunto con el flujo de aire por los cortes en los pasillos laterales se provoca que el aire inyectado se oriente hacia los equipos (ver [Figura 5.20\(a\)](#) y [Figura 5.20\(b\)](#)) lo que aumenta el enfriamiento de los equipos. Otro efecto que se detectó es que contrario a lo esperado el aire de la parte posterior fluye por los cortes en las cortinas hacia el frente del clúster, en la [Figura 5.21](#) se muestra una ampliación de uno de los pasillos laterales, se graficó un plano en esa zona y además se graficaron los vectores de velocidad existentes, con lo cual se puede determinar que el aire fluye hacia la parte frontal, este efecto puede ocasionar que haya recirculación de aire en el clúster, aunque en estas simulaciones el efecto de recirculación no afecta el enfriamiento de los equipos.

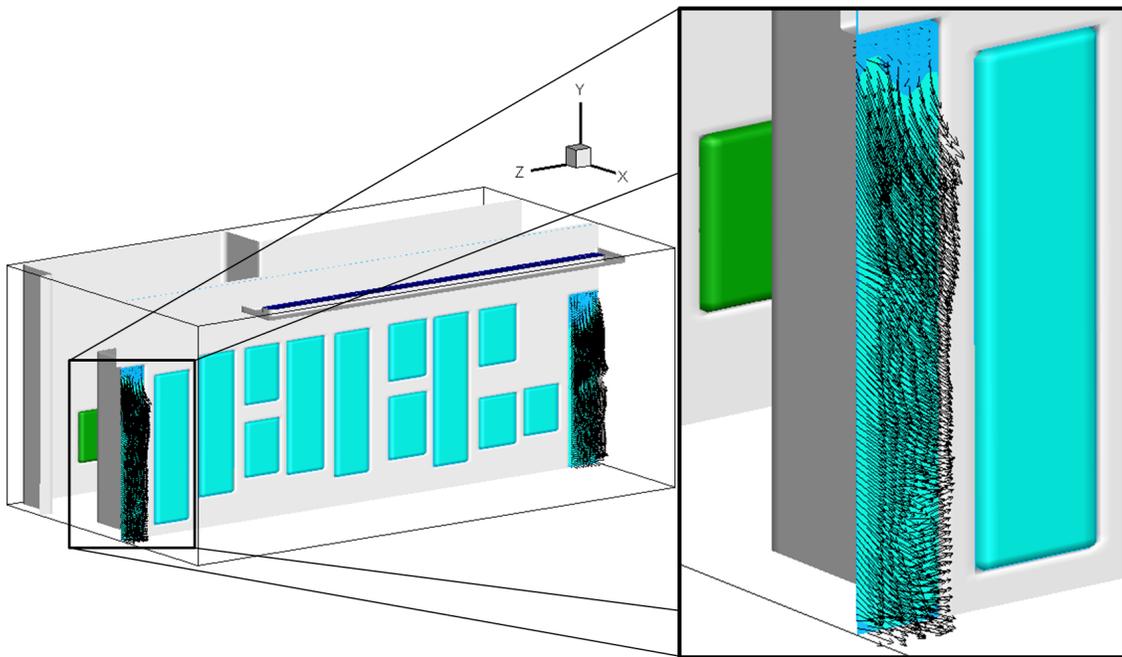


Figura 5.21: Flujo de aire hacia la parte frontal del clúster

Las modificaciones planteadas a la configuración de la propuesta 3 presentan algunos beneficios para promover el enfriamiento de los equipos, esto debido al comportamiento del aire que es inyectado, pero se ocasiona que se tenga presente el fenómeno de recirculación de aire (efecto detectado en la configuración inicial y motivo del sobrecalentamiento). Estas propuestas logran mantener a una temperatura baja los equipos alojados en el clúster, por lo que se podrían emplear en cuarto de cómputo, pero se tendría que modificar la temperatura a la cual se inyecta el aire.

Capítulo 6

Conclusiones

En el presente trabajo se representó numéricamente el estado inicial de la ventilación de un cuarto de cómputo en el que se tenía problemas de sobrecalentamiento en los equipos, se compararon valores de temperatura y velocidades del aire obtenidos prácticamente en el cuarto de cómputo con los datos generados en la simulación del estado inicial del cuarto con lo que fue posible validar la simulación creada. Posteriormente se realizó un análisis del comportamiento del aire que es inyectado al cuarto, con lo cual se identificó que una parte del aire inyectado fluye por la parte baja del clúster y llega a los extractores sin tener contacto con los equipos, al igual se detectó que existía flujo de aire por encima del clúster y este efecto generaba recirculación de aire por los equipos de cómputo lo cual se identificó como la principal causa del sobrecalentamiento en el cuarto.

Con la detección de los factores que ocasionan el sobrecalentamiento de los equipos de cómputo, se crearon propuestas que evitaran el flujo de aire por las zonas en las que su efecto propicia el sobrecalentamiento de los equipos, las propuestas incluían crear bloqueos en algunas partes del clúster y pasillos laterales, mediante la simulación y comparación de los resultados de cada propuesta fue posible identificar qué efectos se producían en el clúster, se determinó qué propuestas no generaban valores de temperatura adecuados para el funcionamiento de los equipos y cuales si serían opciones factibles para solucionar el problema de sobrecalentamiento, al detectarse más de una propuesta adecuada, se decidió recomendar la propuesta que requiriera la menor cantidad de modificaciones en la ubicación de los dispositivos del aire acondicionado ya que eso requeriría realizar trabajos mayores en el cuarto. Se planteó la idea de optimizar la propuesta elegida como la más adecuada, esto realizando algunas modificaciones pero los resultados obtenidos no fueron los esperados, pero aun así se determinó que esos cambios promueven el enfriamiento de los equipos.

Con la realización de esta tesis me fue posible comprender la complejidad e importancia que tiene el realizar simulaciones numéricas en mecánica de fluidos, además de la importancia de saber interpretar los resultados generados para la solución de problemas prácticos y la importancia de validar las simulaciones con valores reales o trabajos ya validados.

La solución del problema planteado en la presente tesis se basó en mantener la temperatura dentro del cuarto en un intervalo adecuado para el funcionamiento de los equipos, lo que tiene como consecuencias un mejor rendimiento de los equipos, un mejor aprovechamiento de la energía utilizada para el enfriamiento lo que a su vez genera un ahorro económico.

Bibliografía

- [Ballesteros et al., 2003] Ballesteros, R., González, J., Fernández, J., and Argüelles, K. (2003). Técnicas numéricas en mecánica de fluidos. *Universidad de Oviedo*.
- [Bash et al., 2003] Bash, C. E., Patel, C. D., and Sharma, R. K. (2003). Efficient thermal management of data centers—immediate and long-term research needs. *HVAC&R Research*, 9(2):137–152.
- [Cho and Kim, 2011] Cho, J. and Kim, B. S. (2011). Evaluation of air management system’s thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers. *Energy and Buildings*, 43(9):2145–2155.
- [Cho et al., 2008] Cho, J., Lim, T., and Kim, B. S. (2008). Cooling systems for it environment heat removal in (internet) data centers. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 7(2):387–394.
- [Cho et al., 2009] Cho, J., Lim, T., and Kim, B. S. (2009). Measurements and predictions of the air distribution systems in high compute density (internet) data centers. *Energy and Buildings*, 41(10):1107–1115.
- [Chorin, 1967] Chorin, A. J. (1967). A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. *Journal of computational physics*, 2(1):12–26. [2.1](#)
- [David, 1993] David, E. (1993). *Modélisation des écoulements compressibles et hypersoniques: une approche instationnaire*. PhD thesis. [2.2](#), [2.2](#)
- [De la Lama, 2010] De la Lama, M. (2010). *Estudio numérico de cuerpos complejos inmersos en un flujo compresible*. PhD thesis, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México. 79p.
- [del Sector Eléctrico, 2010] del Sector Eléctrico, P. (2010). Eléctrico 2010-2025. *Secretaría de Energía*.
- [Fakhim et al., 2011] Fakhim, B., Behnia, M., Armfield, S., and Srinarayana, N. (2011). Cooling solutions in an operational data centre: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 31(14):2279–2291.
- [Gottlieb and Turkel, 1976] Gottlieb, D. and Turkel, E. (1976). Dissipative two-four methods for time-dependent problems. *Mathematics of Computation*, 30(136):703–723. [2.3](#)
- [Hu et al., 2012] Hu, J.-J., Li, H.-C., Tai, H.-M., and Yu, S.-S. (2012). Thermal management and load control of container data center: A case study of cloud computing in a rack. In *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on*, pages 48–51. IEEE.
- [Lesieur and Metais, 1996] Lesieur, M. and Metais, O. (1996). New trends in large-eddy simulations of turbulence. *Annual review of fluid mechanics*, 28(1):45–82. [2.2](#)

- [Morillón Gálvez, 2000] Morillón Gálvez, D. (2000). Metodología para el diseño bioclimático. *Diplomado en Diseño Bioclimático*.
- [Oficial, 2001] Oficial, D. (2001). Norma oficial mexicana nom-008-ener-2001. *Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolverte de Edificios no Residenciales, Segunda Sección, México*, 25:59–100. [1.1](#)
- [PARA,] PARA, E. E.-E. D. E. Norma oficial mexicana nom-020-ener-2011, eficiencia energetica en edificaciones.-envolverte de edificios para uso habitacional considerando. [1.1](#)
- [Perrin and Hu, 2006] Perrin, A. and Hu, H. H. (2006). An explicit finite-difference scheme for simulation of moving particles. *Journal of Computational Physics*, 212(1):166–187. [2.1](#)
- [Salinas-Vázquez et al.,] Salinas-Vázquez, M., Vicente, W., Mendoza, H., Gracia, J., Carrizosa, E., Val, R., Osnaya, J., Palacio, A., and Rodríguez, A. Simulación numérica del flujo en ríos en geometría compleja con transporte de sedimento y contaminantes basado en las ecuaciones de aguas someras. numerical simulation of river flows in complex geometry based in the shallow water equations with sediment and pollutants transport.
- [Shrivastava, 2008] Shrivastava, S. K. (2008). *Cooling Analysis of Data Centers: CFD Modeling and Real-time Calculators*. ProQuest.
- [Shrivastava et al., 2006] Shrivastava, S. K., Iyengar, M., Sammakia, B. G., Schmidt, R., and VanGilder, J. W. (2006). Experimental-numerical comparison for a high-density data center: Hot spot heat fluxes in excess of 500 w/ft². In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm'06. The Tenth Intersociety Conference on*, pages 402–411. IEEE.
- [Vázquez and Métais, 2002] Vázquez, M. S. and Métais, O. (2002). Large-eddy simulation of the turbulent flow through a heated square duct. *Journal of Fluid Mechanics*, 453:201–238. [2.1](#)
- [Yunus, 2007] Yunus, A. C. (2007). Transferencia de calor y masa. *Enfoque práctico*.