

**Especialidad: Sistema de Medición, Metrología / Calidad en las Mediciones**

**Título: ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL DE UN LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL: diseño, implementación y evaluación de funcionamiento.**

**Autores:**

- Brambilla, Nancy, Ing. Electricista Electrónica, Profesora Titular UTN-FRC (Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba), Investigadora y Directora del Centro de Metrología CEMETRO-UTN.
- Schürer, Clemar, Dr. En Física, Profesor Titular UTN-FRC, Investigador CEMETRO-UTN.
- Brusa, Daniel, Dr. En Física, Profesor Adjunto UTN-FRC, Investigador CEMETRO-UTN.
- Oviedo, Hugo, Estudiante de Ingeniería Mecánica, Auxiliar de 2da, Becario CEMETRO-UTN.
- Caselles, Juan, Ingeniero Aeronáutico, Jefe de Trabajos Prácticos, Responsable Calidad CEMETRO-UTN

**Resumen:**

Para un óptimo funcionamiento de un laboratorio de metrología dimensional es absolutamente necesario el control de las condiciones ambientales y su estabilidad temporal dentro de estrechos rangos de tolerancia, siendo además un requisito técnico expresado en el apartado 5.1 de la norma ISO/IEC 17025 “Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”

La calidad del servicio de medición, entendida como la exactitud (veracidad y precisión) de los resultados, está fuertemente influenciada por las magnitudes de influencia externa, en el caso dimensional la fuente de mayor incidencia es la temperatura en la sala de medición y los gradientes térmicos temporales y espaciales.

Si bien muchos equipos realizan sus compensaciones térmicas, las mismas solucionan una parte del problema, ya que quedan además de las incertidumbres propias de los sensores, los coeficientes de dilatación térmica de los materiales, que ingresan en la reducción de datos generando nuevas componentes y aumentando la incertidumbre final.

El trabajo presenta el proyecto y la exitosa implementación del sistema de acondicionamiento ambiental del laboratorio universitario de referencia CEMETRO, especificado bajo estrictas tolerancias y en base a estándares internacionales.

Se referencia el análisis de la documentación específica consultada, los requisitos funcionales del equipamiento instalado, las especificaciones de diseño y la implementación de la obra.

Finalmente se muestra un método para realizar la evaluación de funcionamiento y comprobar el desempeño contra las especificaciones de diseño, se exponen los resultados obtenidos y se dan los lineamientos para requerimientos más específicos dentro del laboratorio.

### **CV reducido conferencista**

**Nombre:** Nancy Leonor BRAMBILLA

Ingeniera Electricista Electrónica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (1989).

Postgrado: Maestría en Ciencias de la Ingeniería-Mención Administración en Facultad de Ingeniería (UNC), tesis en curso  
Profesora Titular por concurso de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN)

Profesora Titular por concurso, Cátedra Teoría de Redes y Control de la Facultad de Ingeniería de la UNC.

Directora del Centro de Metrología CEMETRO, UTN; Facultad Regional Córdoba, desde 2005 con continuidad.

Profesional técnico en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) en el período 1990-2005, desarrollando tareas en el ámbito de la Metrología, calibración de instrumentos, elaboración de procedimientos, realización de auditorías técnicas.

Realizó cursos de especialización en temas de Aseguramiento de Calidad, Cálculo de Incertidumbre de Medición, Metrología, Incertidumbre en Mediciones Analíticas, Validación de Métodos.

Ha dictado cursos de formación de su especialidad a prestigiosas empresas e instituciones del medio.

## 1. Introducción

Para un óptimo funcionamiento de un laboratorio de metrología dimensional es absolutamente necesario el control de las condiciones ambientales y su estabilidad temporal dentro de estrechos rangos de tolerancia, siendo además un requisito técnico expresado en el apartado 5.1 de la norma ISO/IEC 17025 “Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”.

La ISO 17025, en el apartado 5.1 Generalidades, expresa la necesidad general de disponer de instalaciones y condiciones ambientales acordes a los requerimientos del tipo de servicio de medición y/o ensayo a realizar en el laboratorio.

El requisito de acondicionamiento ambiental de un laboratorio de metrología dimensional depende del tipo de mediciones a realizar y del grado de exactitud de las mismas, por lo tanto debe partirse de esa consideración para dar las especificaciones del proyecto.

La exactitud se cuantifica, tomando las definiciones de la ISO 5725-1, como la suma de la veracidad más la precisión de los resultados, es decir además del error sistemático se agrega la incertidumbre combinada del sistema de medición, evaluada en base a la ISO GUM.

En líneas generales, el error sistemático queda determinado por la exactitud del equipamiento involucrado, los errores máximos admisibles declarados por el fabricante y por la calidad de los patrones por un lado, y por el otro por la estabilidad de la temperatura de referencia.

Según los estándares internacionales la temperatura de referencia en metrología dimensional es de 20 °C. Para especificar el rango de variación en torno a los 20 °C se proponen dos caminos complementarios: establecer valores en base a estudio de laboratorios de referencia operativos con características similares y efectuar una evaluación inversa de incertidumbre para definir el impacto de la variación térmica en sistemas de medición clásicos y abarcativos de las prácticas a realizar en el laboratorio CEMETRO.

### 1.2 Cuantificación del problema

Los instrumentos de medición realizan compensaciones térmicas en base a sus sensores internos, sin embargo por más que los sensores y el efecto de la compensación sean de alta calidad no están exentos de errores e incertidumbre. De manera equivalente los coeficientes de expansión térmica ( $\alpha$ ) de las piezas a medir y de las escalas de los instrumentos, ingresan en la reducción de datos aportando sus componentes de incertidumbre que es del orden del 10% de su valor. Esto significa que una barra de acero de 1 m de longitud, cuyo coeficiente de dilatación térmica está especificado o puede asumirse como  $\alpha = (11,5 \pm 1,2) \cdot \{\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}\}$ , en un ambiente con  $T_{\text{ref}} = 20 \pm 1 \{^{\circ}\text{C}\}$ , tendrá una componente de incertidumbre de 1,2  $\mu\text{m}$  debido a la fuente de incertidumbre del coeficiente de dilatación térmica.

Se deben establecer el rango de variación en órdenes de algunas décimas de °C y controlar la evolución de la temperatura en el ambiente, en el punto de medición, los gradientes de temperatura temporales y los gradientes de temperatura espaciales.

En las máquinas de medir unidimensional y tridimensional por contacto o en mediciones con instrumentos de mano es la temperatura de la pieza a medir (mesurando) y del instrumento los valores de mayor interés, en especial cuando las mediciones se realizan en cortos períodos de tiempo. Además suelen acondicionarse localmente las áreas de trabajo mediante cabinas especialmente diseñadas.

En cambio, en las mediciones ópticas, con autocolimador de campo oscuro, interferómetro laser, escalas laser, entre otros, influye también y en mayor medida la temperatura del aire y los gradientes térmicos temporales y espaciales por su impacto

en la evolución del índice de refracción del aire, con incidencia directa en los resultados finales.

## **2. Diseño del proyecto. Variables a considerar**

Las especificaciones iniciales del acondicionamiento de las salas se realizaron en base a consultas de los siguientes documentos internacionales:

- Laboratory Design-Recommended Practice RP-7, NCSL (National Society of Standards Laboratories)
- Instrument Society of America, ISA-RP52.1, "Recommended Environments for Standards Laboratory", 1995.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, "ASHREA Fundamental Handbook", 1993.

Además se tuvo en cuenta:

1) Los requisitos funcionales del equipamiento e instrumental a instalar, especificados por los fabricantes, en especial de: máquina de medir tridimensional Legex Mitutoyo, comparador mecánico de bloques patrón Mitutoyo, interferómetro laser Renishaw, redondímetro Taylor Hobson, Autocolimador Nikon, entre otros.

2) Los mecanismos de transferencia de calor que provocan inestabilidad en la temperatura son radiación, convección y conducción.

La radiación proviene mayormente de paredes, pisos, ventanas, lámparas, equipamiento, sistemas de control, operadores. Para reducir la influencia se aconseja recubrir paredes para minimizar la emisividad (aluminio en hoja o lámina), recubrir el piso, mantener las luces y equipos eléctricos encendidos todo el tiempo, doble vidrio en ventanas con 100 mm de aire.

La Convección producida por aire acondicionado, computadoras, sistemas de control, motores, puede reducirse su influjo mediante la provisión de recintos intermedios como único acceso al área de control de temperatura, uso de ventiladores en fuentes de calor de computadoras, máquinas. El sistema de aire acondicionado debe diseñarse para producir una distribución estable de temperatura y compensar la influencia de personas y otras fuentes de calor, en este sentido se debe considerar que una persona disipa alrededor de 110 W (habrá entre 4 y 5), un rugosímetro consume alrededor de 150 W, una MMC consume alrededor de 1000 W.

La Conducción desde las fuentes internas de las máquinas, piso y/o fundación, operadores. Para reducir la influencia se recomienda aislar térmicamente la estructura de las máquinas de la fundación.

3) Entres las consideraciones propias del sistema de control de temperatura se plantea atender a:

- la dirección del flujo de aire: puede ser vertical u horizontal. En una sala de metrología dimensional se prefiere flujo vertical materializándose ya sea: utilizando un plenum, con perforaciones distribuidas en el techo para ingreso del aire y perforaciones sobre el zócalo para egreso del aire, o bien, con entradas de aire ubicadas en el techo y las salidas de aire ubicadas en las paredes.

- el tipo de flujo de aire: laminar o turbulento, este último se asocia a la mejor conducción del calor o laminar para lograr mejor control del polvo.

- la velocidad y el caudal de aire: el sistema debe proveer un caudal de aire constante, un sistema de control on-off no resulta adecuado. Como valor indicativo se propone 20 renovaciones/hora.

- el modo de regulación: el control de temperatura debe ser constante. En la mayoría de los sistemas con temperatura controlada, el aire pasa primero por un enfriador y luego

por un calefactor, para tener mayor estabilidad en la temperatura del aire y controlada la humedad relativa.

- la ubicación de los sensores: varios sensores ubicados en diferentes lugares.

- la reducción del impacto térmico con el exterior: el diseño de recintos intermedios para reducir los disturbios que introduce el ingreso de personas y cosas.

En relación a la luz y otras radiaciones, se estipulan las siguientes condiciones:

- la iluminación a niveles mínimos de entre 500 y 600 lux para sala de MMC y con nivel para mediciones manuales entre 700 y 800 lux.

Debe llegarse a un equilibrio entre cubrir las necesidades del operador para trabajar y evitar una excesiva radiación de calor sobre los equipos. Se recomienda mantener luces encendidas todo el tiempo, ya que el encendido y apagado genera un error cíclico en función de la contracción y dilatación de la máquina y las piezas sometidas a medición. Para mediciones de gran exactitud resulta importante la radiación del cuerpo humano, por ejemplo el comparador de bloques patrón, deben tomarse recaudos especiales mediante el uso de pantallas de aislamiento térmico, uso de pinzas, sistemas de vacío, etc.

Prácticas comunes para reducir la influencia de las radiaciones en la temperatura:

- ↪ Las fuentes de calor deben mantenerse siempre encendidas.
- ↪ La MMC debe ubicarse a 1,5 m de las paredes exteriores. Los equipos e instrumentos menos sensibles se ubican en el entorno, y los más sensibles, se ubican al centro.
- ↪ Las paredes externas deben aislarse adecuadamente.
- ↪ Evitar el contacto directo con los elementos a medir y con los equipos. Utilizar guantes.
- ↪ Los elementos a medir deben estar en equilibrio térmico con los instrumentos de medición y con el ambiente.

La Humedad relativa ambiente, debe mantenerse en  $45 \pm 5 \%$ , estando el límite inferior definido por cuestiones de bienestar humano y el límite superior para evitar la corrosión de los metales por condensación de la humedad.

Para la limpieza, control de polvos se recomienda una presurización de 1,27 mm de agua escalonada desde las salas interiores, intermedias y exteriores, para conseguir una sala limpia clase 100.000, de la Federal Specification FS 209E.

El nivel sonoro debe controlarse por dos razones: los ruidos son generados por vibraciones y los equipos son susceptibles a vibraciones y no menos importante los ruidos perturban al operador.

La ASHRAE provee las curvas NC (Noise Criteria), siendo recomendable un máximo de NC 50 de nivel de sonido.

Si no se consigue eliminar adecuadamente las vibraciones deben implementarse montajes aislados para el equipo de acondicionamiento y para los instrumentos de medición.

Las consideraciones a tener en cuenta en este sentido son:

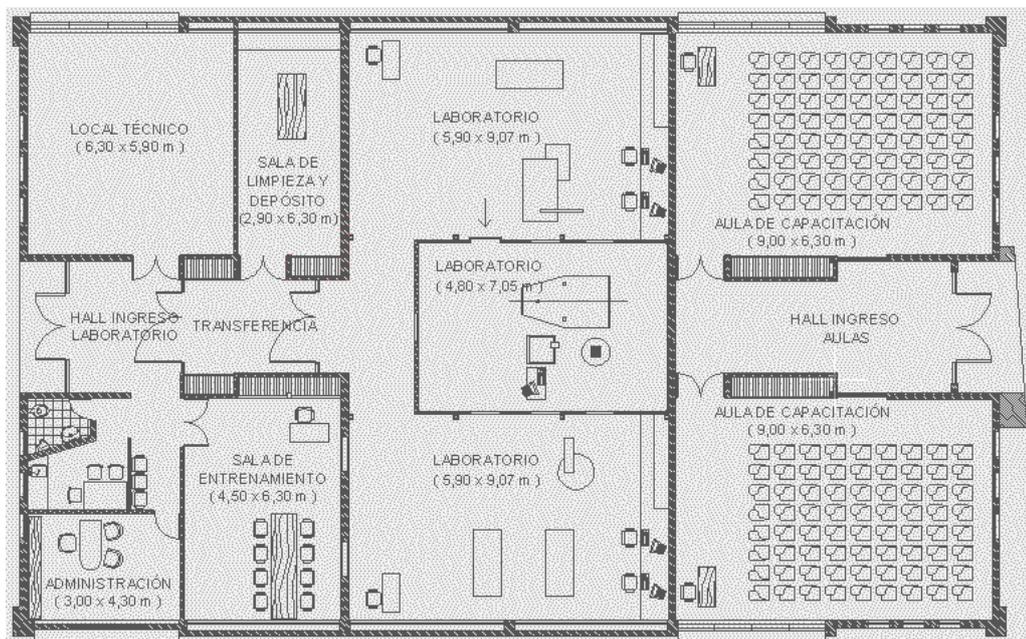
- Ubicar a la mayor distancia practicable las fuentes de vibración y los equipos de medición
- Utilizar materiales que absorban y/o amortigüen (arena, siliconas, poliestireno, etc.)
- Ubicar el equipo sobre un soporte aislante
- Diseñar una fundación apropiada, teniendo en cuenta las vibraciones actuales y potenciales y la estabilidad a largo plazo del aislamiento. No es posible conseguir una fundación libre de vibración.

### 3. Especificaciones de pliego

En base a todos los argumentos mencionados, se prevé el proyecto técnico de un sistema de acondicionamiento de aire a los efectos de controlar la temperatura, la humedad, el filtrado del aire, la renovación y presurización de los diferentes locales y sectores del edificio del laboratorio para conseguir las especificaciones de condiciones ambientales indicadas en la Tabla 1, dentro de las salas mostradas en los planos adjuntos, en modo de uso continuo.

N°	Local		Limpieza	Temperat	Humedad	Gradiente	Gradiente	Cargas int. kW
				°C	Relativa %	Termico Espacial	Termico Temporal	
1	1001	Laboratorio medición	Menos de $1 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 1 µm Menos de $5 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 0,5 µm No haya partículas de más de 50 µm	20 ± 0,3 °C	40 a 50	0,5° C/m	0,5° C/h	2,0 kw
2	2001	Laborat 1	Menos de $4 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 1 µm Menos de $2 \times 10^6$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 0,5 µm No haya partículas de más de 50 µm	20 ± 0,5 °C	40 a 50	0,5 °C/m	0,5 °C/h	1,6 kw
2	2002	Laborat 2	Menos de $4 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 1 µm Menos de $2 \times 10^6$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 0,5 µm No haya partículas de más de 50 µm	20 ± 0,5 °C	40 a 50	0,5 °C/m	0,5 °C/h	1,3 kw
2	2003	Hall ingreso	Menos de $4 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 1 µm Menos de $2 \times 10^6$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 0,5 µm No haya partículas de más de 50 µm	20 + 0,5 °C	40 a 50			0,5 kw
2	2004	Transfer	Menos de $4 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 1 µm Menos de $2 \times 10^6$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 0,5 µm No haya partículas de más de 50 µm	20 + 1 °C	40 a 50			0,3 kw
2	2005	Sala Recep. y limpieza	Menos de $4 \times 10^5$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 1 µm Menos de $2 \times 10^6$ partículas/m <sup>3</sup> mayores de 0,5 µm No haya partículas de más de 50 µm	20 + 1 °C	40 a 50			0,8 kw

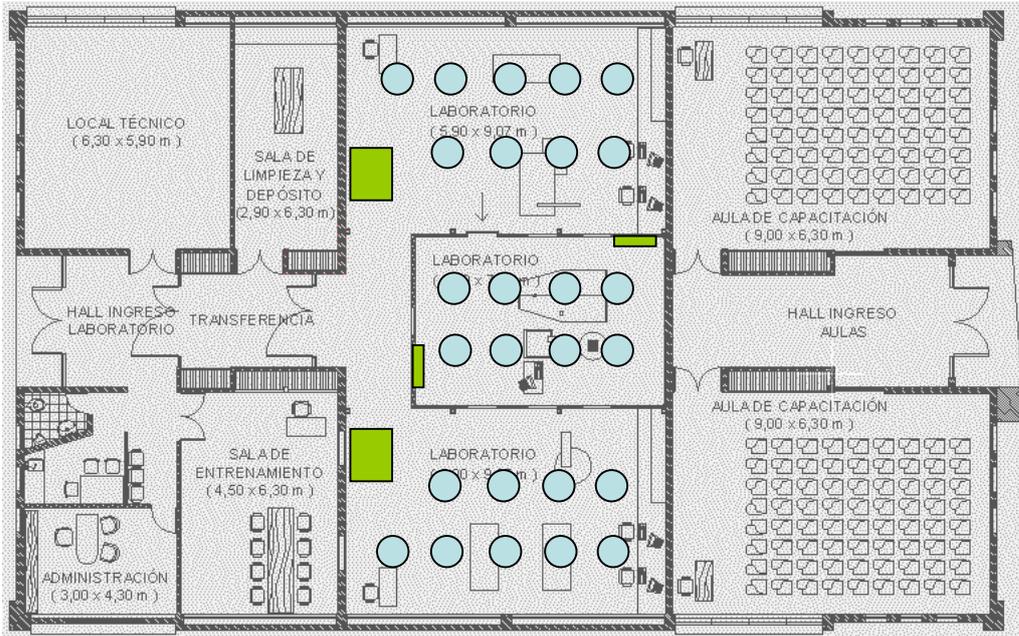
Tabla 1



Plano del laboratorio

#### 4. Implementación

Se calcula el equipamiento y se ejecuta la instalación intercalando pruebas intermedias durante el proceso que permite mejorar la performance inicial. Se implementa la distribución de la cañería y las entradas y retornos de aire.



○ Ubicación de ventanas de impulsión de aire

■ Ubicación de ventanas de retorno de aire

#### Distribución de las entradas y retornos de aire propuesta

##### Capacidad técnica de la Unidad de Tratamiento de aire 1:

Manejadora de aire Equipo UMA-1: Servicio: Área de Medición MMC

-Módulo aspiración y mezcla, con dos persianas manuales, con puerta de acceso.

-Módulo de serpentina de refrigeración con filtros planos G-4.

-Módulo de Serpentina de calefacción eléctrica.

-Módulo ventilador/separador: Con puerta de acceso.

-Módulo de filtros F-9-Módulo descarga con persiana de alimentación.

-Dimensiones disponibles para el equipo aproximadas: largo:6 m, alto:2 m, ancho:2m

Caudal de Aire: 775 l/s (2.800 m<sup>3</sup>/h)

Caudal de Aire Exterior: 155 l/s (20%)

Presión estática externa estimada: 600 Pa (\*)

Motor Ventilador:

Refrigeración: Velocidad frontal: 2 m/seg

Entrada aire retorno: 20,0° C TBS / 50% HR.

Entrada aire exterior:36,0° C TBS / 40% HR

Salida aire: 9,65° C TBS / 99% HR

Capacidad sensible/capacidad total:11,05 kW /14.3 kW

Caudal de agua: 2,95 m<sup>3</sup>/h

Temp. entr./salida agua: 7,00 °C/11,96 °C

Calefacción: Capacidad: 6,3 kW

Etapas: 3

Entrada de aire retorno: 17°C / Salida de aire 27°

## Capacidad técnica de la Unidad de Tratamiento de aire 1:

Equipo UMA-2: Servicio: Laboratorios y áreas de servicio varias

-Módulo aspiración y mezcla, con dos persianas manuales, con puerta de acceso.

-Módulo de serpentina de refrigeración con filtros planos G-4.

-Módulo de Serpentina de calefacción eléctrica.

-Módulo ventilador/separador.

-Módulo de filtros F-9. Módulo descarga con persiana de alimentación.

Caudal de Aire: 5.760 m<sup>3</sup>/hr

Caudal de Aire Exterior: 865 m<sup>3</sup>/h

Presión estática externa estimada: 500 Pa

Motor Ventilador:

Refrigeración:

Velocidad frontal: 2 m/seg

Entrada aire retorno: 20,0° C TBS / 50% HR.

Entrada aire exterior: 36,0° C TBS / 40% HR

Salida aire: 9,65° C TBS / 99% HR

Capacidad sensible/total: 19.100 Cal/hr / 24.300 Cal /hr

Caudal de agua: 97,5 l/min

Temp. entr. Agua/sal. agua: 7,00 °C /11,96 °C

Calefacción:

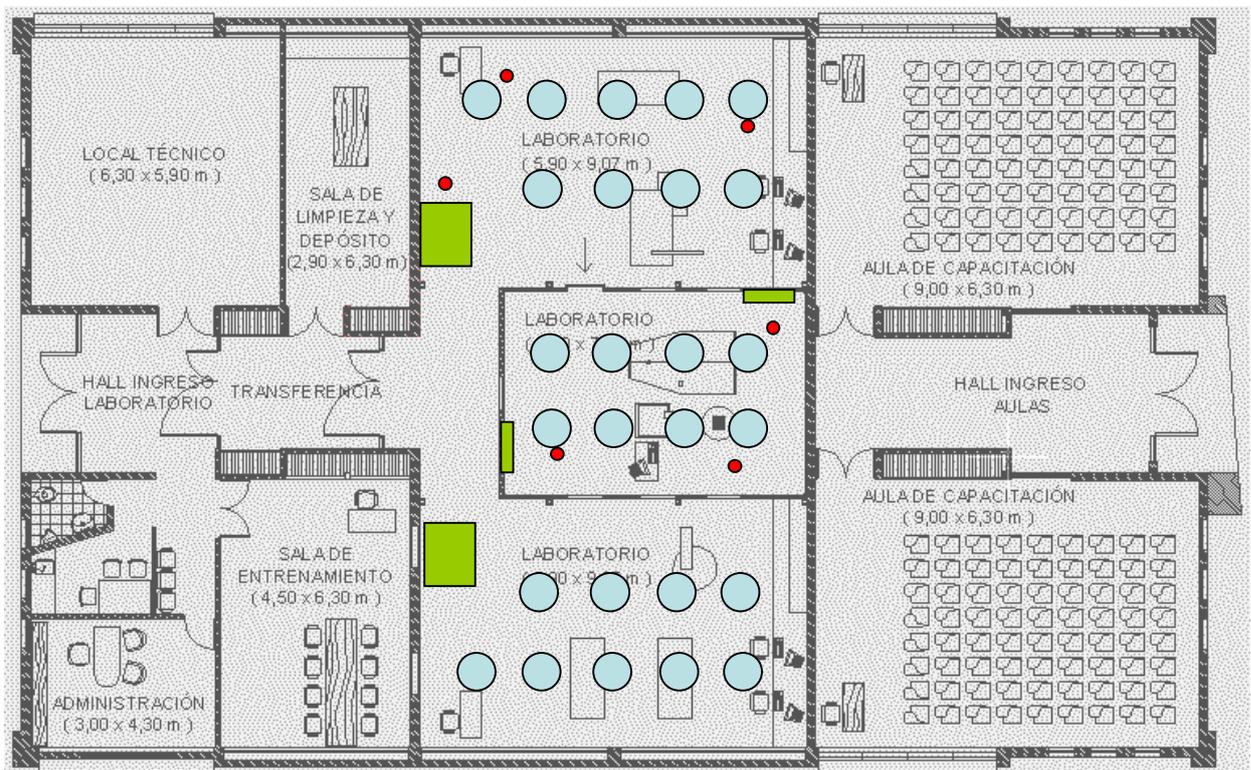
Capacidad: 10 kW

Etapas: 3

Entrada de aire retorno: 17°C/ Salida de aire 22.5°C

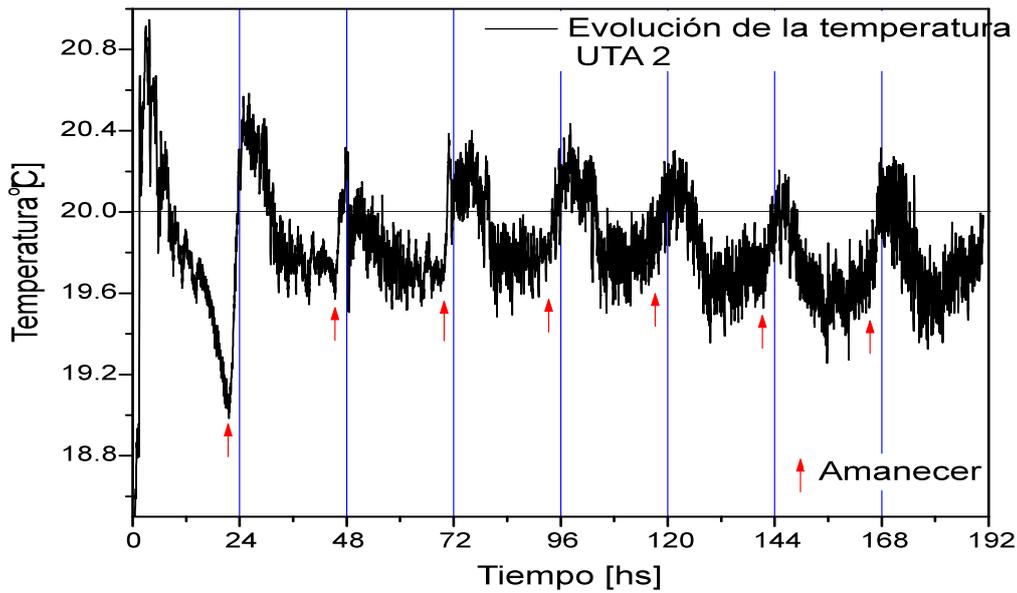
## 5. Evaluación de funcionamiento

Para evaluar el desempeño del sistema se propone una distribución de sensores y la toma de datos extendida en el tiempo para su posterior evaluación y análisis según se presenta.

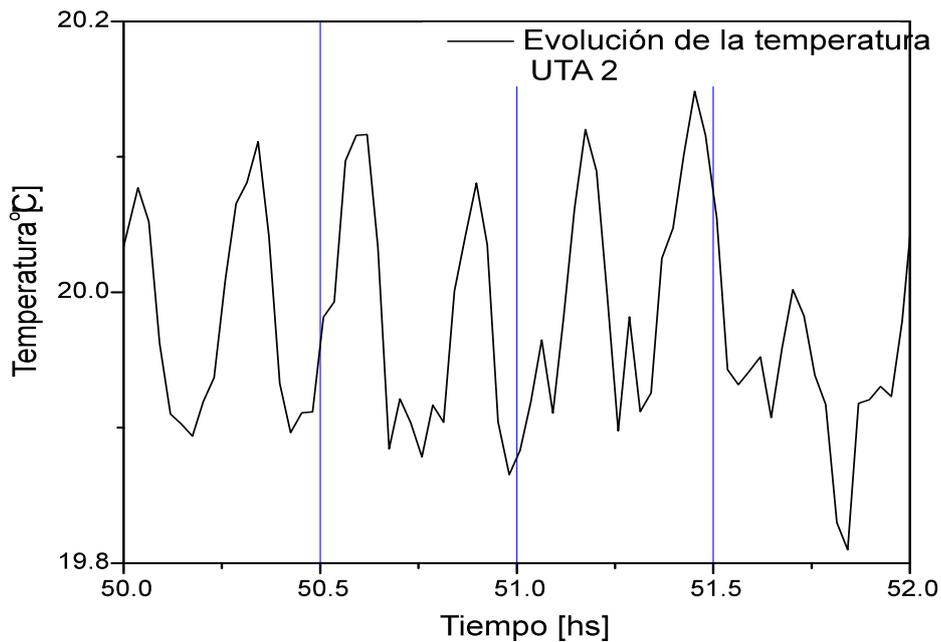


- Ubicación de los sensores de temperatura PT 100/ PT 1000 y FLUKE calibrado

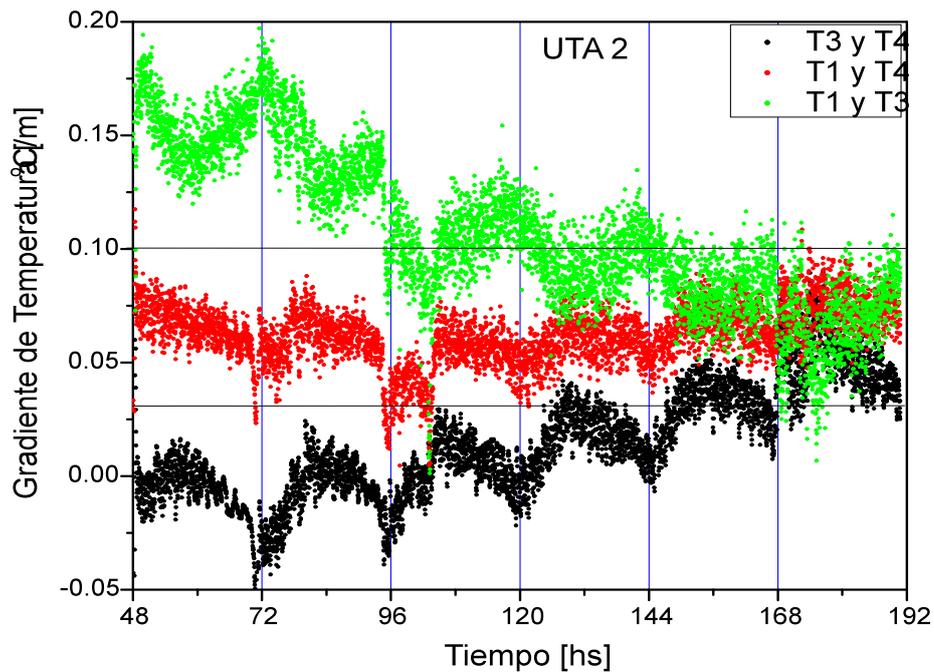
## 5.1 RESULTADOS UTA 2



Se observa la evolución de la temperatura desde el momento de encendido del equipo de climatización, los primeros dos días existen fluctuaciones que llegan a una estabilización con variación es de  $\pm 0.4$  °C. El período es de 24 horas provocadas por el día y la noche, manteniendo una media de 20 °C durante el día.

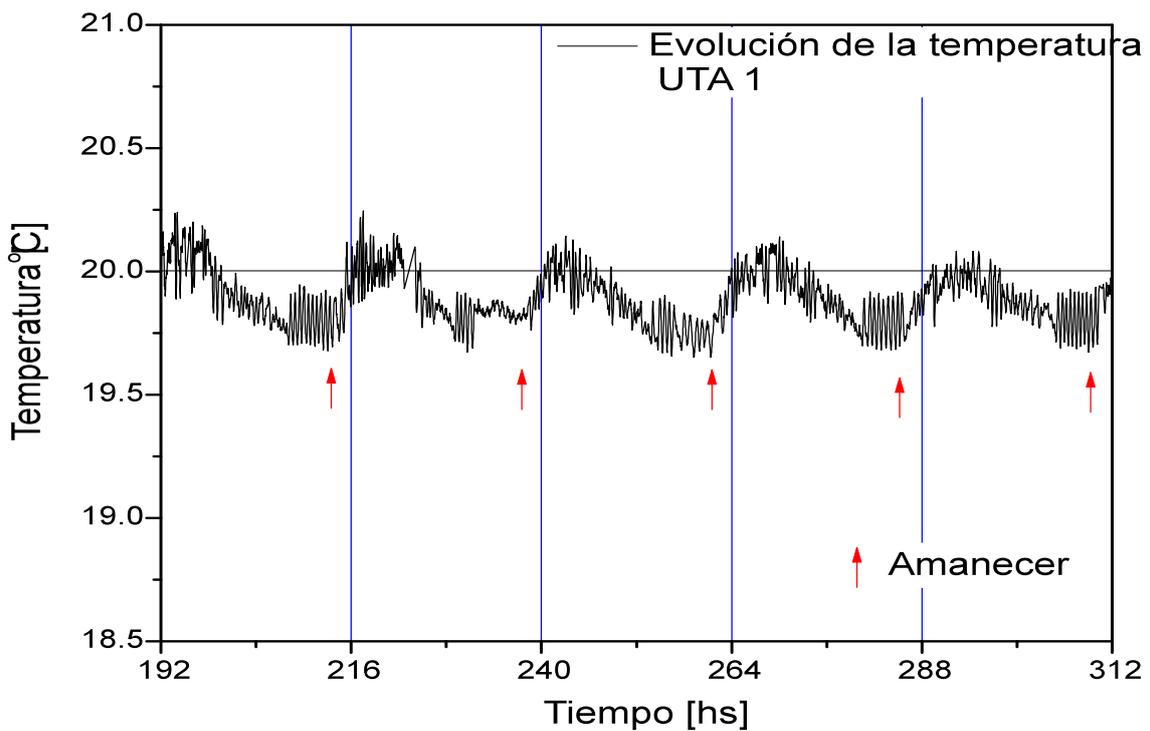


Una observación más detallada nos muestra fluctuaciones de  $\pm 0.1$  °C con una periodicidad de aproximadamente 30 minutos.

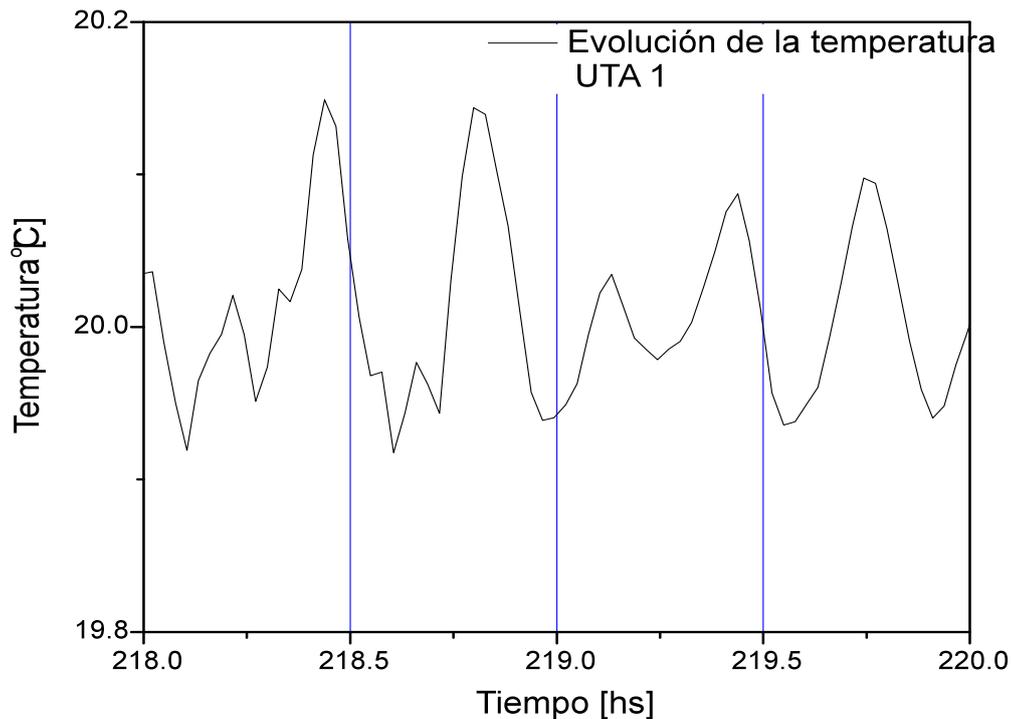


Los gradientes de temperatura tienden a estabilizarse en un rango de  $\pm 0.04 \text{ }^\circ\text{C}$

## 5.2 Resultados UTA 1



Se observa que la fluctuación de la temperatura dentro de la UTA 1 es de  $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  son menores a las de la UTA 2, debido al mayor aislamiento que presenta respecto al medio ambiente. El período de las fluctuaciones es de 24 horas provocadas por el día y la noche, manteniendo una media de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  durante el día.



Una observación más detallada nos muestra fluctuaciones de  $\pm 0.1$  °C o menores con una periodicidad de aproximadamente 30 minutos. Notándose una pequeña disminución en las variaciones con respecto a las de la UTA 2.

## 6. Conclusiones

- Los resultados de la evaluación de la temperatura reflejan un comportamiento de mejores características que las especificadas en los pliegos
- El aislamiento térmico tiene una incidencia vital en la inercia térmica del edificio
- Se consigue una incidencia despreciable del efecto de las variaciones de la temperatura sobre las mediciones, verificado por cálculos de incertidumbre
- Se planea realizar evaluaciones con disposiciones distintas de los sensores para recabar información en otras zonas de las salas.
- Se planea realizar evaluaciones en distinta época del año: temperatura mínima exterior en invierno: - 5 °C y temperatura máxima exterior en verano: + 40 °C