

Optimización del Proceso Analítico en el Laboratorio Ambiental X para el Equipo Mufla: Reducción de Tiempo y Controles de Seguridad

Lariann M. Díaz Torres
Maestría en Manufactura Competitiva
Mentor: Rafael Nieves, Pharm D.
Universidad Politécnica de Puerto Rico
Graduate Project EXPO, Mayo 2026

Resumen — El laboratorio ambiental X enfrenta retrasos en los resultados analíticos de los procedimientos que requieren la prueba de combustión, ya que la mufla opera fuera del horario laboral. Además, existe el riesgo de exposiciones a gases nocivos como CO entre otros, al personal, debido a que son liberados en un sistema de ventilación cerrado. Para solucionar este evento, se desarrolló el proyecto con el objetivo de implementar un sistema de extracción eficiente que transfiera los gases liberados al exterior del laboratorio. El método DMADV se aplicó para seleccionar un extractor apropiado. La implementación de un ventilador dedicado a la mufla que extrae los gases de combustión durante las horas laborables acorta los periodos laborales y restablece la salud del personal. También, cumple con las regulaciones estatales y federales. Valorando tres cotizaciones, se sugirió el Hood Sentry Air System por su eficiencia en calidad, capacidad, costo y seguridad laboral.

Palabras Claves— CO Gases Tóxicos, DMADV, HOOD, Mufla.

DESARROLLO DEL PROBLEMA

En un laboratorio ambiental X se desarrollan investigaciones ecológicas centradas en los ecosistemas vegetales y marinos. Para ello, se recolectan muestras de agua, suelo, tejido, que son sometidas a análisis químicos y/o pruebas biológicas. Entre los análisis efectuados se encuentran la determinación del porcentaje de carbono en muestras de suelo seco y la extracción y medición de elementos pesados.

Durante el período del 18 al 25 de noviembre de 2025, se realizaron visitas al laboratorio X para

observar el proceso analítico de determinación del porcentaje de carbono, que requiere el uso del horno conocido como mufla, programado con ciertas temperaturas y tiempos para ejecutar el proceso de combustión. En este proceso, las muestras liberan concentraciones de gases tóxicos que se dispersan directamente en la atmósfera del laboratorio. Debido a esto, el coordinador implementa la activación de la mufla al finalizar la jornada laboral, con el fin de evitar que el personal permanezca expuesto a las emisiones durante el proceso. Al ejecutar estos pasos incorporados en los procedimientos, se reduce la eficiencia laboral.

DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

A través de esta evaluación, se proporcionará al coordinador del laboratorio información sobre las emisiones, junto con recomendaciones de medidas de control para instalar un ventilador o campanas de extracción, y sugerencias para mejorar los protocolos de seguridad, de acuerdo con los reglamentos establecidos, en beneficio del personal.

OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Reforzar la seguridad ocupacional.
- Evaluar las tecnologías complementarias del equipo, incluidas los sistemas de extracción y ventilación controlados.
- Mejorar la eficiencia laboral.
- Sugerir la creación de un protocolo y/o la revisión de los procedimientos existentes.

Contribuciones de la Investigación

El proyecto contribuirá en términos de costo, calidad y uso eficiente del tiempo. Sobre la contribución al costo y la calidad, la implementación de un sistema adecuado de ventilación de gases reducirá los gastos asociados a los problemas de salud y aumentará la efectividad de trabajo en las horas de jornada laboral. La implementación de un extractor de gases contribuirá en gran medida a la reducción de los gastos por reparaciones en las áreas físicas o el reemplazo de equipos aledaños a la mufla. En términos de tiempo, podemos ver que las contribuciones son favorables, ya que se reduce el tiempo de proceso y el uso del laboratorio, simultáneamente con el uso de la mufla.

REVISIÓN LITERARIA

El control de las emisiones de gases en el laboratorio es fundamental para proteger la salud del personal y el medio ambiente. Los equipos de alta temperatura (muflas) representan fuentes significativas de gases nocivos, por lo que esta investigación establece las bases normativas y conceptuales para el manejo de dichas emisiones.

Equipo de Laboratorio: Mufla

La mufla contiene una cámara cerrada construida con materiales refractarios e aislantes que resisten altas temperaturas, hasta 1700 °C. Tiene una puerta con seguro que permite el acceso a la cámara con un orificio en la parte superior para la expulsión de gases tóxicos, vapores y/o partículas. La función de la mufla es alcanzar altas temperaturas, entre 1100 a 1700 °C. Uno de los usos más comunes es transformar las muestras en ceniza [1].

Salud Ocupacional en el Laboratorio

Agencias reguladoras como la “Occupational Safety and Health Administration” (OSHA) han desarrollado normas específicas (29 CFR 1910.1450) que establecen límites permisibles de exposición a diversas sustancias químicas [2].

Según la norma 29 CFR, una medida preventiva que reduce la exposición ocupacional a sustancias químicas es el uso de una campana [3]. El uso de una campana de extracción ayuda a proteger la salud y la seguridad del personal y a cumplir con las regulaciones de las agencias pertinentes.

Regulaciones, Normas y Leyes en Puerto Rico

En Puerto Rico, los contaminantes se regulan mediante el Reglamento Núm. 5300, conocido como “Regulations for the Control of Atmospheric Pollution” Departamento de Recursos Naturales (DRNA) [4]. El reglamento dispone que no se permite la construcción u operación de una estructura, un equipo o una instalación que descargue contaminantes al aire sin un permiso vigente. Según DRNA, todos los equipos e instalaciones que emiten contaminantes al aire requieren un permiso antes de liberar emisiones al ambiente [5]. Los que operan sin el permiso están expuestos a sanciones o requerimientos de documentos que cumplan con las normas.

ANSI/AIHA Z9.5

La “American National Standards Institute” (ANSI) y la “American Industrial Hygiene Association” (AIHA) desarrollaron la norma técnica ANSI/AIHA Z9.5. La intención es que se aplique una ventilación adecuada en los laboratorios. El control de emisiones de gases o vapores internos es un componente crítico de la higiene industrial y una de las mejores prácticas para los sistemas de ventilación en el laboratorio [6]. ANSI/ASSP Z9.5-2022 establece que las muflas deben contar con sistemas de extracción localizada, capaces de capturar emisiones de gases mediante la campana de extracción, además de un dispositivo de control de exposición y sistemas dúctiles cuya captación esté diseñada específicamente para el equipo [6].

Riesgos para la Salud Asociados a la Exposición a Monóxido de Carbono (CO)

El componente CO es un gas incoloro, inodoro, insípido y no irritante, lo que dificulta su detección

sin instrumentación adecuada [7]. Basándose en esta perspectiva de peligrosidad, la agencia de OSHA establece un Límite de Exposición Permisible (LEP) para el CO de 50 parte por millón (ppm) como promedio ponderado de su exposición en ocho horas laborables, lo que refleja su mayor toxicidad. [2].

Metodología

Lean Six Sigma desarrolla una metodología estructurada llamada DMADV. Las siguientes cinco fases están para dirigir al personal a lo largo de todo el proyecto establecido. La metodología se divide en 5 fases que se presentan a continuación:

Definir. Es el paso que establece la base para todo el proyecto y el punto de partida para las etapas restantes.

Medir. Esta fase recopila datos precisos. Se identifican las necesidades explícitas e implícitas del cliente, transformándolas en técnicas medibles con métricas claras.

Analizar. Evaluar y analizar datos para explorar opciones. Luego se evalúan los riesgos para determinar los desafíos de cada opción, Concluye, tomando decisiones con herramientas sistematizadas, seleccionando el mejor.

Diseñar. Es el inicio de la infraestructura en base a la selección tomada. Este paso consiste en materializar e implementar el proceso o producto de acuerdo con las expectativas solicitadas.

Verificar. Después de tener un plan detallado del diseño, se procede a probar y validar las ideas implementadas en base a su funcionamiento y los resultados de las pruebas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología DMADV fue empleada en este proyecto.

Definir

En el laboratorio ambiental X, de ventilación cerrada, se emiten gases nocivos, entre otros componentes, al ambiente cuando se ejecutan pruebas de combustión mediante el uso del equipo térmico llamado mufla. La exposición directa de los

gases al ambiente cae en incumplimiento con las normas y/o regulaciones estatales e internacionales. También, afecta indirectamente las condiciones físicas del laboratorio. El objetivo del proyecto se define recopilando información de la exposición de componentes liberado por la mufla, evaluar la mejor opción para aislar los mismos de una forma segura. Luego, se implanta el diseño que refuerce la salud y seguridad del personal bajo un plan progresivo y estipulado. Al concluir la verificación del montaje, se valida el sistema certificando la remoción de los gases liberados por las muflas, ver Figura 1. Según lo contempla la regulación ANSI/ASSP Z9.5-2022 (“Laboratory Ventilation”), todo proceso que genere contaminantes por calor debe evaluarse desde el diseño del laboratorio, priorizando la protección del personal mediante ventilación localizada [8].



Figura 1

Muflas En El Laboratorio Ambiental X

Medir

La medición cuantitativa se centra en la determinación de las concentraciones de gases nocivos liberados durante el proceso térmico. Para cubrir el objetivo de esta fase, se provee para este proyecto un detector portátil de gases llamado SN-FH307, ver Figura 2. El instrumento “Voice-Assisted Multi-Gas Detector”, modelo SN-FH307 (Shenzhen Bodachuang Elc. Co.) está certificado para detectar concentraciones de CO, entre otro. El detector se localiza cerca de la mufla en uso para detectar los gases emitidos a una distancia promedio de 23 metros cúbicos. SN-FH307 permite registrar concentraciones de CO en (ppm) mayores de 30 según progresan las etapas cíclicas térmicas de la mufla.



Figura 2
Detector MultiGas SN-FH307

De manera complementaria, se obtuvo el plano del laboratorio X en la Figura 3, lo que permitió evaluar los parámetros físicos y dimensiones del espacio, con el objetivo de buscar la mejor opción para ubicar e implementar el sistema de ventilación para el uso de los equipos térmicos. Con base en las dimensiones (largo, ancho y alto) de cada mufla, se diseñó un diagrama por computadora que indica las medidas requeridas para la implementación del ventilador, junto con los componentes necesarios para su operación; ver Figura 4.

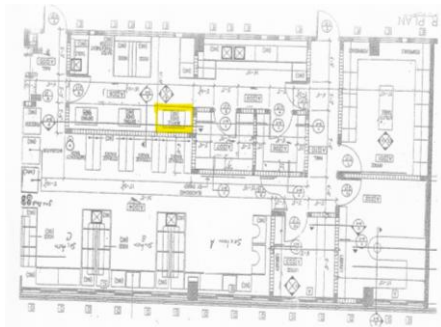


Figura 3
Plano del Laboratorio Ambiental X

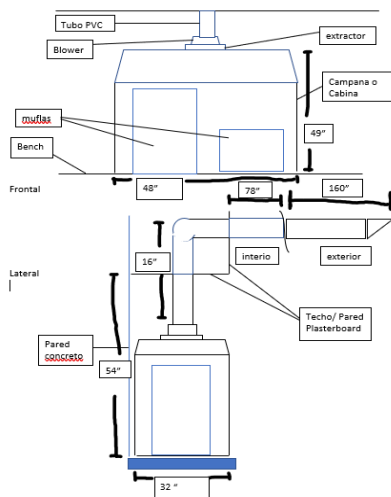


Figura 4
Dimensiones del Extractor con las Muflas

Analizar

En los procesos de combustión, la liberación de gases de componentes de carbono proviene de la cámara donde se encuentran las muestras. Al usar la mufla para realizar la prueba, se registran lecturas de temperatura, el tiempo de exposición de las muestras y la emisión de monóxido de carbono (CO) en ppm, utilizando el detector SN-FH307. Para liberar carbono orgánico, el suelo se expone a un aumento gradual de la temperatura hasta 550 °C durante aproximadamente 4 horas. En dicho periodo, se registró variabilidad en la lectura de la concentración de CO superior a 31 ppm en tiempos cortos y precisos. Para analizar estos datos, se procedió a graficar los valores obtenidos.

La Figura 5 muestra el perfil de emisión de CO (ppm) en función del tiempo, junto con el incremento progresivo de la temperatura (°C) durante un proceso de combustión en la mufla. A lo largo de la prueba, se observa cómo el comportamiento del gas CO varía en respuesta al aumento gradual de la temperatura de la cámara de la mufla.

En la fase inicial del proceso (250 a 320 °C), se observa una alta variabilidad en las concentraciones de CO, con picos cercanos a 400 ppm. Esta concentración indica el comienzo de la descomposición inicial de los compuestos carbonos orgánicos o de residuos presentes en la muestra tomada. Las grandes fluctuaciones en la gráfica indican que las reacciones aún no han alcanzado un estado estable de liberación de CO por debajo de 31 ppm. Por lo cual, la concentración fluctúa con el aumento de la temperatura a medida que transcurre el tiempo.

Entre 330 y 420 °C, el CO tiende a disminuir, aunque aún se detectan algunos picos intermitentes. Esto sugiere que el suelo marino continúa liberando CO en compuestos volátiles, pero en menor cantidad. También en este punto, suele ocurrir simultáneamente una oxidación en la que parte del CO producido se convierte en CO₂, liberados por el vapor creado en el proceso de combustión.

En la fase final del proceso (entre 450 y 550 °C), hasta completar el tiempo programado, las emisiones de CO disminuyen significativamente y se mantienen por debajo de 31 ppm. Esta fase indica que la mayor parte del material susceptible de degradación térmica ya ha sido consumido o transformado de CO a CO₂.

En la Figura 6 se muestra la prueba de combustión para suelo arcilloso (arena), que requiere incrementar la temperatura hasta 950 °C durante 4 horas. Su fase inicial de descomposición del carbono, liberando CO, se observa a una temperatura aproximada de 600 °C. Las lecturas detectadas del gas de CO por el instrumento fluctúan entre 31 a 38 ppm y finaliza la lectura menor de 31 ppm cuando alcanza la temperatura aproximada de 645 °C. El proceso de combustión para liberar monóxido de carbono continúa a lo largo de todo el proceso analítico. La descomposición del carbono inorgánico (CaCO₂) es lenta, por lo cual, el detector SN-FH307 no expresa lectura ya que es menor de 31 ppm.

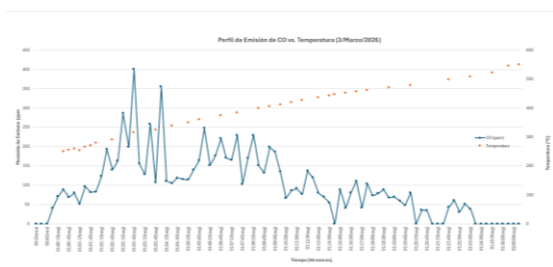


Figura 5
Perfil de Emisión de CO vs. Temperatura (°C) (3/Mar/2026)
Muestras de Suelo Orgánico

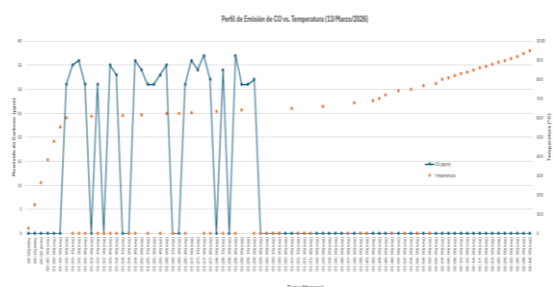


Figura 6
Perfil de Emisión de CO vs Temperatura (°C) (13/Mar/2026)
de Suelo Marino (Arena)

En términos operacionales, la gráfica evidencia que el proceso térmico generado por la mufla

presenta tres etapas claras: la fase inicial de una liberación intensa de gases, la etapa intermedia de transición con disminución progresiva de concentración de CO, y la fase final de estabilización con concentraciones menores de 31 ppm.

Al comparar los valores observados, se indica claramente que los límites permisibles de exposición al CO se excedieron, violando normas ocupacionales y regulaciones internacionales. La exposición de concentraciones entre 100 y 400 ppm son resultados alarmantes que requiere la salida del personal cuyo ambiente laboral proviene de un sistema de ventilación cerrada. La agencia OSHA establece que el límite permisible de exposición es de 50 ppm como promedio ponderado de 8 horas laborables [8]. Asimismo, la agencia NIOSH recomienda un límite de 35 ppm para exposiciones de 8 horas y un valor máximo de 200 ppm para exposiciones cortas. La agencia ACGIH establece un valor umbral de 25 ppm para jornadas laborales de 8 horas [9].

En los laboratorios con ventilación cerrada, los límites tienden a ser rigurosos, ya que las concentraciones de gases permanecerán expuestas durante un tiempo prolongado en el aire respirable. Para cumplir con las regulaciones de las agencias, se requiere la implementación de un ventilador de gas o “Hood” para el uso de la mufla, y el gas, vapor y/o partículas liberadas por la mufla deben transportarse hacia el exterior del laboratorio.

Las muflas se ubican en un cuarto confinado, aledañas entre sí, sin la debida ventilación y sin un mecanismo de extracción que aisle o transfiera los gases hacia la atmósfera. Con la información provista, el uso de la mufla para las pruebas de combustión tiende a ser de 100 a 120 veces anualmente y su uso es constante durante todo el año (ver Tabla 1). ANSI/ASSP/Z9.5-2022 establece que cuando los contaminantes se generan por una fuente específica, la ventilación general no es suficiente para garantizar la protección del personal [6]. Se optó por modificar la tarea laboral y revisar el procedimiento de análisis de combustión, indicando que, al culminar las labores del día, se

procede a activar las muflas. Sin embargo, esto no confirma si, al día siguiente, las concentraciones de gases nocivos dispersos están dentro de los límites.

Tabla 1

Frecuencia Uso de la Mufla en el Laboratorio Ambiental X

Uso de la mufla	Cantidad
Frecuencia de uso mensual	Aproximadamente 10 veces
Frecuencia de uso anual	Aproximadamente 100-120 veces
Tiempo de uso	Se activa después de la jornada laboral de trabajo a) Activarlo a 550 °C por 4 horas y 30 minutos b) Activarlo a 950 °C por 4 horas y 30 minutos
Tiempo de exposición	Los gases emergentes que parten de los 30 minutos según la temperatura va incrementando
Volumen de muestra procesada	El total de muestras fluctúa desde 40 gramos hasta 70 gramos dependiendo de los puntos de muestreo que se estén colectando

También se usó el método Ishikawa de causa-raíz del problema [10]. El “Fishbone” (ver Figura 6) presenta los elementos que conducen al problema de la presencia de gases nocivos en el laboratorio. La principal fuente del problema no es únicamente la generación de gases, sino la ausencia de un sistema de extracción directamente acoplado a la mufla. Tanto la fase analítica, como la de Ishikawa, identificaron la implementación de un ventilador exclusivo para el uso de las muflas.

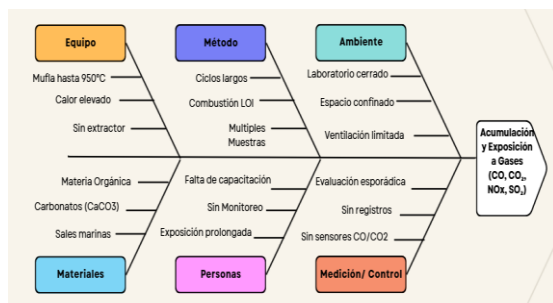


Figura 6
Diagrama de Ishikawa/Fishbone

Diseño

La fase busca una solución técnica que asegure que el sistema de ventilación seleccionado cumpla con los requisitos de seguridad ocupacional, eficiencia operativa y control ambiental. Para el

laboratorio ambiental X de ventilación cerrada, el diseño se dirige a ubicar e instalar un sistema de extracción de gases, vapores y partículas producidos durante el análisis de combustión generado por equipos térmicos. Actualmente, estas emisiones son liberadas al medio ambiente del laboratorio al concluir las horas laborables.

El diseño del sistema de extracción debe tener la capacidad de capturar gases y vapores corrosivos liberados, manteniendo una presión negativa constante en el interior del ventilador y evitando el retorno de las emisiones al ambiente. La estructura del “Hood” tiene que ser de acero inoxidable o materiales resistentes a la corrosión. Los ductos que dirigen los gases capturados hacia el exterior del laboratorio también deben ser de materiales resistentes a la corrosión, como el acero galvanizado, el acero inoxidable o el PVC. El diseño de la salida del ducto tiene que ser sencilla y directa, disminuyendo que puedan reducir la velocidad del flujo de aire o pérdida de presión negativa en el ventilador.

El tercer componente es el extractor mecánico (“Blower”). La rotación del abanico del “Blower” extrae el flujo de aire que entra a través del sistema de ventilación “Hood”, generando una presión negativa. El modelo de extractor mecánico que se ajusta al proyecto es el ventilador de centrifuga con motor externo. El extractor mecánico se ubica en el exterior del laboratorio cerca de la salida de flujo de aire para asegurar que los gases, vapores y/o partículas liberadas dentro del sistema de ventilación “Hood” sean transportados al exterior. La descarga del aire impulsado por el extractor debe dirigirse hacia la atmósfera a una altura específica, lejos de la entrada de un sistema de ventilación y alejada de la presencia de personas.

Para implementar un ventilador, se evaluaron tres sistemas de ventilación con distintas tecnologías de extracción. El sistema de ventilación, catalogado como “fume hood” y fabricado por Labconco Inc. [11], presenta el modelo “Protector”, diseñado para manejar reactivos ácidos. En la Tabla 2, resume los requisitos en seguridad, orientada a procesos

químicos corrosivos y potencialmente peligrosos. Su fabricación es de acero inoxidable tipo 316, lo cual eleva su resistencia a la corrosión química y a la acumulación de residuos. También incorpora un sistema de lavado interno, permitiendo la remoción de depósitos peligrosos en las paredes internas y la base del ventilador. El sistema opera mediante ventilación cerrada con panel frontal deslizante. Su requerimiento de flujo de aire al exterior oscila entre 725 y 1640 pies cúbicos por minuto (CFM), lo que asegura una alta eficiencia en la captación de gases, vapores y residuos. Sin embargo, al requerir un “Blower” de alta potencia, esto conlleva un mayor consumo energético. El ventilador cumple con la mayoría de las normativas estatales e internacionales, lo que presenta una solución aceptable para procesos químicos. No obstante, su diseño resulta sobredimensionado para la integración de la mufla y conflige con la liberación de emisiones de gases debido a la conversión térmica.

Tabla 2
Especificaciones Hood Labconco[11]

Parametron	Valor
Catalogado	Fume Hood químico
Material	Acero inoxidable 316
CFM	725 – 1640
Velocidad Captura	100–125 fpm
Sistema	Cerrado (sash)
Seguridad	Alta
Normas	OSHA, ANSI Z9.5, NFPA 45

El sistema de ventilación manufacturado por Sentry Air Systems, está catalogado como campana “canopy”. El ventilador está diseñado para capturar en forma vertical los contaminantes generados por fuentes térmicas mediante el aprovechamiento del fenómeno conocido como convección natural. La Tabla 3 proyecta detalles específicos sobre su estructura, función y competitividad con respecto a los Hood. Su estructura frontal es abierta, lo que permite la instalación directa de la mufla sobre el extractor y facilita la captación de los gases y vapores calientes, así como la suspensión de partículas, al ser estos menos densos debido a la diferencia de densidad con respecto al ambiente exterior. El rango de flujo de extracción de aire

fluctúa entre 250 a 700 CFM, lo convierte en una alternativa energéticamente eficiente. Su construcción es con materiales resistentes a la corrosión, garantizando la durabilidad y funcionalidad del equipo. El sistema de ventilación, catalogado como campana, resulta adecuado.

Tabla 3
Especificaciones de Sentry Air System (SAS) [12]

Parámetro	Valor
Catalogada	Canopy / extracción localizada
Material	Acero inoxidable + Policarbonato
CFM	250 – 700
Velocidad Captura	Media
Sistema	Abierto
Seguridad	Media
Normas	Limitadas (estándares básicos)

El sistema de ventilación “Frontier ACELA” de ESCO está orientada a una tecnología avanzada de extracción enfocada en la eficiencia energética. En la Tabla 4 se sintetiza las características esenciales del Hood. Su estructura está diseñada con materiales de fibra de vidrio, epoxi y policarbonato. El ventilador se maneja mediante modelación computacional de fluidos de aire (CFD), optimizando el comportamiento del flujo de aire al disminuir el consumo energético (aprox 60 fpm) a un 60% en comparación con Hood convencionales. A pesar de operar con una extracción de flujos entre 541 a 1203 CFM, mantiene un alto nivel de extracción y seguridad según lo establecen los estándares estatales e internacionales.

Tabla 4
Especificaciones para Frontier ACELA de ESCO [13]

Parámetro	Valor
Catalogado	Low Flow Fume Hood
Material	Fiberglass + epoxy
CFM	541 – 1203
Velocidad captura	60 fpm
Sistema	Cerrado optimizado
Seguridad	Alta
Normas	ANSI Z9.5

Al igual que el sistema Labconco, se orienta a la manipulación directa de químicos, restringiendo su aplicación en procesos térmicos al utilizar equipos como la mufla.

La Tabla 5 presenta un resumen comparativo de los tres sistemas de ventilación para determinar su capacidad de extraer las emisiones nocivas liberada por equipos térmicos en cumplimiento con las agencias reguladoras.

Los sistemas de Fume Hood (Labconco y ACELA) ofrecen una calidad en términos de contención química, protección del usuario y cumplimiento normativo del laboratorio y de agencias, sin embargo, su diseño está orientado a pruebas analíticas directas sin la intervención de conversiones térmicas. El sistema de extracción de SAS, aunque su diseño presenta una menor capacidad de contención, ofrece una calidad funcional más adecuada para la captura de gases, vapores y/o partículas generadas. El mantenimiento y durabilidad del sistema de ventilación, en los Fume Hood tienden a ser más elaborados y complejos. Requieren de mantenimientos más rigurosos como la calibración de flujo, inspección de los componentes y la verificación de los ductos de flujo. En comparación con el sistema de campana SAS, este presenta una menor complejidad mecánica y estructural, lo que reduce la frecuencia de mantenimiento. El 60% de la inspección básica del equipo estaría a cargo del personal de laboratorio, por lo que la certificación de la campana y la inspección de sus componentes se programan anualmente.

En términos de relación costo–beneficio, el sistema de campana SAS de “Sentry Air Systems” presenta la mejor convicción entre inversión inicial, costos operacionales y técnicas específicas para su uso. En adición, cumple con los principios básicos de ventilación para ejercer la función de capturar los gases generados por la mufla y está en cumplimiento con las regulaciones.

En términos de costo inicial, hay una diferencia significativa entre los ventiladores. El sistema Labconco presenta un costo aproximado de \$4,100, lo cual, es accesible bajo el criterio catalogado como “fume hoods”. El sistema de “Sentry Air Systems” tiene un costo cercano a \$4,998 con un diseño exclusivo para uso del equipo, el cual se va a integrar en el ventilador. El “Hood” Frontier

ACELA, representa la inversión más alta de \$15,500. Su tecnología es avanzada, sin embargo, no es adecuada para el uso de extracción de gases liberados por conversiones térmicas. Los sistemas de Fume Hood comunes operan con una cantidad elevada de revoluciones (hasta 1640 CFM), lo que implica un mayor consumo energético e incrementa los costos a largo plazo.

Por consiguiente, de acuerdo a los criterios de diseño pautado en la metodología DMADV, se selecciona el sistema de ventilación catalogada como “canopy” respaldado por su eficiencia energética, cumplimiento de procesos térmicos, facilidad de operación y conformidad con la regulación.

Verificar

El ventilador seleccionado de acuerdo con los criterios previos del modelo DMADV, cumple con los requerimientos necesarios para el uso de la mufla. Una vez verificado, será técnicamente viable, y atenderá eficazmente las necesidades del laboratorio, confirmando la captura de gases nocivos o contaminantes peligrosos liberados por la mufla, y protegiendo al personal de su exposición.

La verificación inicial abarca desde la ubicación e inspección física del equipo hasta la parte operativa al instalarlo. El posicionamiento del ventilador respecto de la mufla debe confirmar que no interfiera con las condiciones laborales o ergonómicas del personal. La inspección física se centra en la fijación del sistema al soporte, la integridad estructural del ducto, la conexión del extractor mecánico y la descarga del aire al exterior. Asimismo, se comprueba la compatibilidad de los materiales a altas temperaturas y la extracción de los gases emitidos durante el proceso térmico. Al finalizar la instalación del sistema de ventilación, no debe presentar desviaciones que comprometan su funcionamiento. La prueba operacional del sistema de ventilación se realiza para verificar su capacidad de extraer los gases emitidos por la mufla y evitar su dispersión en el ambiente del laboratorio. La evaluación se realiza mediante pruebas de humo o

trazadoras visuales para observar el comportamiento y el aspecto direccional del flujo de aire, en forma ascendente, hacia el ducto del ventilador.

La verificación también contempla la validación o certificación del sistema operativo de ventilador. El técnico certificado comprueba que la revolución del flujo de aire diseñado por el ventilador mantenga su velocidad para capturar o remover los gases liberados por la mufla, y que no presente fugas o resistencia en el ducto que puedan surgir por fallas mecánicas o interrupciones durante el proceso de combustión. La certificación se considera completa una vez se ejecute la prueba de funcionamiento del ventilador mediante la activación de la mufla, para verificar que la estabilidad térmica de la cámara se mantenga constante durante un proceso operativo normal de combustión.

Después de certificar el sistema de ventilación, se le suministran al laboratorio documentos, como procedimientos y formas, entre otros, que permitan operar el equipo durante el uso de la mufla en pruebas térmicas. Esta información asegura que el diseño seleccionado cumple no solo con los criterios técnicos, sino también con las consideraciones operacionales.

Al abordar el tema de la salud y seguridad ocupacional, se retoma el ejercicio de verificar y evaluar la exposición residual que pueda generarse en el área cercana al ventilador seleccionado durante el proceso de liberación de emisiones nocivas emitidas por la mufla. La evaluación consiste en monitorear el ambiente utilizando el detector MultiGas SN-FH307 para registrar las concentraciones de CO durante la prueba de combustión. El objetivo es confirmar que el sistema de ventilación cumpla su función, removiendo concentraciones altas de CO, manteniendo el mismo por debajo de 31ppm de acuerdo con los estándares estatales e internacionales. También se integran evaluaciones cualitativas basadas en entrevistas con el personal del laboratorio. Estas entrevistas se dirigen a condiciones físicas que el personal pueda expresar, como dolor de cabeza, acumulación de calor, incomodidad respiratoria, calidad del aire, entre otras, durante los procesos de combustión en horas laborales.

La verificación incluye documentación mediante inspecciones, pruebas y recomendaciones, sirviendo como evidencia de que el sistema de ventilación cumple con las expectativas del proyecto y que el mismo es aplicable al laboratorio X.

Tabla 5
Evaluación de Costo-Calidad del Sistema de Extracción

Manufacturero	Labconco ("Chemical Fume Hood")	Sentry Air System Ventilacion Aislada- Extractor	ESCO ACELA ("Low Flow Hood")
Sistema Catalogado	Cerrado	Campana	Cerrado
CFM	725 – 1640	250 – 700	541 – 1203
Velocidad Captura	100–125 fpm	Promedio	60 fpm
Consumo energético	Alto	Bajo	Medio – Bajo
Eficiencia energética	Baja	Alta	Muy Alta
Uso para equipo térmicos	Baja	Alta	Promedio
Nivel de contención	Muy alto	Medio	Alto
Regulaciones Estatales e Internacionales	Completo	Básicos	Completo
Complejidad del sistema	Alta	Baja	Alta
Costo de mantenimiento	Alto	Bajo	Promedio
Facilidad de instalación	Compleja	Alta	Compleja
Durabilidad	Acero inoxidable 316	Acero inoxidable + Policarbonato	Fiberglass + epoxy
Aplicación ideal	Químicos Corrosivos	Conversion Térmicas	Pruebas Químicas
Costo-Efectivo	Promedio	Alta	Promedio
Costo inicial (USD)	~\$4,100	~\$4,998	~\$15,500

CONCLUSIÓN

Al completar el proyecto usando la metodología DMADV de Lean Six Sigma, se ajustó de forma técnica la selección apropiada de un ventilador para el uso de los equipos térmicos. Los criterios se enfocaron de manera objetiva y con base en la situación real que enfrenta el laboratorio, con sistema de ventilación cerrado, ante el problema de la exposición de gases nocivos al personal ocupacional tras culminar el proceso de combustión en horarios no laborales. También, parte del objetivo del proyecto fue proporcionarle los documentos e instrumentos necesarios para monitorear el área, con la intención de permitir operar el equipo en un lapso corto. El costo de implementar el sistema de ventilación fluctúa entre el promedio de la mayoría de los Hood convencionales, lo cual es razonable para el laboratorio ambiental X. Su estructura está compuesta por materiales anticorrosivos para reducir la frecuencia de mantenimiento e inspección del equipo para propósitos operacionales. El ventilador cumple con las normativas del laboratorio y regulaciones para la seguridad del personal.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Bonilla Castañeda, K. J. Gutiérrez Quiceno, F. J. Osorio Vélez y M. V. Sánchez Escobar, *Módulo III: Equipos de laboratorio*, Escuela de Tecnología Química, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, pp. 9–11, 2020.
- [2] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *Occupational Exposure to Hazardous Chemicals in Laboratories*, 29 CFR § 1910.1450, U.S. Department of Labor, Washington, DC, USA. [En Línea]. Disponible: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1450>.
- [3] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), “29 CFR 1910.1450 — Occupational exposure to hazardous chemicals in laboratories,” in *Electronic Code of Federal Regulations*, U.S. Department of Labor. [En Línea]. Disponible: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/29/1910.1450>.
- [4] Commonwealth of Puerto Rico, *Regulation for the Control of Atmospheric Pollution (Reglamento Núm. 5300)*, Environmental Quality Board (actualmente DRNA), San Juan, PR, 1995. [En Línea]. Disponible: [Regulations-for-the-Control-of-Atmospheric-Pollution-RCAP-1995-Regulation-No-5300.pdf](#).
- [5] Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA), “Área de Calidad de Aire — Permisos y Formularios,” San Juan, PR. [En Línea]. Disponible: <https://www.drna.pr.gov/acai/permisos/>.
- [6] B. Kelechava, “ANSI/ASSP Z9.5-2022: Laboratory Ventilation,” *The ANSI Blog*, May 23, 2022. Washington, DC, USA. [En Línea]. Disponible: <https://blog.ansi.org/ansi/ansi-assp-z9-5-2022-laboratory-ventilation/>.
- [7] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), “Carbon monoxide (CO): Workplace safety and health topics,” Centers for Disease Control and Prevention, 2018. [En Línea]. Disponible: <https://www.cdc.gov/niosh/carbon-monoxide/about/index.html>.
- [8] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), “29 CFR § 1910.1000 Table Z-1 — Limits for Air Contaminants,” U.S. Department of Labor. [En Línea]. Disponible en: https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1?utm_source=chatgpt.com.
- [9] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), “Carbon monoxide — Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH),” in *American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) TLVs 1993-1994*, Centers for Disease Control and Prevention (CDC), May 1994. [En Línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/630080.html>.
- [10] Instituto Kaizen, US “Understanding the Ishikawa Diagram: A Key Tool for Root Cause Analysis,” *kaizen.com* [En Línea]. Disponible: <https://kaizen.com/insights/ishikawa-diagram-root-cause-analysis/>.
- [11] Labconco Corporation, *Protector® Special Application Laboratory Fume Hoods; Stainless Steel Perchloric Acid Laboratory Hoods — Features, Specifications and Dimensional Data*, Labconco Inc., Kansas City, MO, USA, Brochure.
- [12] SAS-Sentry Air Systems, *Customized Hoods: Design, Applications, and Customization Process for Fume and Particulate Removal Systems*, SAS-Sentry Air Systems, Inc., Cypress, TX, USA, Brochure.
- [13] Esco Lifesciences Group, *Frontier® Acela™ High Performance Fume Hood: Design Features, Technical Specifications, and Safety Performance*, Esco Technologies, Inc., Horsham, PA, USA, Brochure.