

## 5. CUARTOS LIMPIOS Y LOS SECTORES PRODUCTIVOS QUE LOS USAN EN MÉXICO

### CLEANROOMS AND THE PRODUCTIVE SECTORS THAT USE THEM IN MEXICO

*Dr. Cuauhtémoc León Puertos<sup>9</sup>, Dr. Cirilo Gabino León Vega<sup>10</sup>*

**Fecha recibido:** 28/07/2021

**Fecha aprobado:** 23/ 11/2021

**IV CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN EDUCACIÓN, EMPRESA Y SOCIEDAD – CIDIEES**

**Derivado del proyecto:** Cuartos Limpios y los Sectores Productivos que los Usan en México

**Institución financiadora:** Instituto Politécnico Nacional

**Pares evaluadores:** Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad – REDIEES.

---

<sup>9</sup>Ingeniero en sistemas computacionales, ESCOM IPN, Doctorado en ingeniería sistémica, ESIME Zacatenco IPN, subdirector de Micro y Nanotecnologías, Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del IPN, correo electrónico: cleon@ipn.mx.

<sup>10</sup>Ingeniero en comunicaciones y electrónica, ESIME IPN, Doctorado en ingeniería sistémica, ESIME Zacatenco IPN, Profesor Investigador, IPN, correo electrónico: cleonv@ipn.mx.

## RESUMEN

Este trabajo presenta los conceptos básicos sobre los cuartos limpios (salas blancas); aborda definición, clasificación conforme a las normas nacionales NOM e internacionales ISO, que son las que regulan desde la clasificación de la limpieza del aire, hasta la clasificación por la concentración de nanopartículas, entre otras; además de identificar las clases de cuartos limpios que existen, y la aplicación en las diversas industrias que los utilizan a nivel mundial, con especial énfasis en los laboratorios de micro dispositivos electromecánicos (MEMS), existentes en México.

El objetivo principal es comprender el panorama actual en México sobre el uso de los cuartos limpios en las diferentes industrias; para ello, se realizó una revisión de la literatura internacional de instancias gubernamentales, académicas, agencias reguladoras; empresas desarrolladoras; así como de revistas científicas. El método de investigación utilizado en este trabajo es el descriptivo, con el propósito de responder a la interrogante sobre los beneficios de la fabricación de MEMS en México con el uso de los cuartos limpios.

La revisión literaria permitió adquirir un mayor conocimiento sobre el uso de cuartos limpios en México para la fabricación de MEMS; esto a su vez, permite reflexionar sobre los avances tecnológicos actuales, las normas y estándares nacionales e internacionales que rigen su diseño y funcionamiento, así como futuras investigaciones de cuartos limpios para fabricación de MEMS.

**PALABRAS CLAVE:** *Cuartos Limpios, MEMS, ISO14644-1, Industrias, México.*

## ABSTRACT

This paper introduces the basic concepts about cleanrooms (sometimes spelled as clean rooms); it encompasses its definition, classification according to (NOM) national and (ISO) international regulation, which regulate anything from classification of air quality, all the way to the classification by nanoparticle concentration, among others; besides identifying the existing kinds of cleanrooms, and the application in the various industries that use them throughout the world, with special emphasis in the micro electromechanical system (MEMS) labs, that exist in Mexico.

The main aim is to understand the current landscape in Mexico about the use of cleanrooms in the different industries; to achieve this, a review of international documental information was carried out from government and academic instances, regulatory agencies; companies that develop cleanrooms; as well as scientific magazines. The research method used on this paper was the descriptive research method, with the purpose of answering the question about the benefits from the manufacture of MEMS in Mexico that make use of cleanrooms.

The literature review allowed for a greater knowledge about the use of cleanrooms in Mexico for the manufacture of MEMS; this in turn, allows for the reflection of the current technological breakthroughs, the national and international norms and standards that govern their design and operation, as well as future research with regards to cleanrooms for the manufacture of MEMS.

**KEYWORDS:** *Cleanrooms, MEMS, ISO14644-1, Industries, Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

El avance de la ciencia en diferentes sectores como la salud, la ciencia y la tecnología, han sido importantes para el desarrollo científico, pero en esta ocasión, se destacan los avances en la micro y nanotecnología. A tal efecto, se presenta el tema sobre cuartos limpios, los cuales han jugado un papel de suma importancia durante ya más de medio siglo, debido a que han propiciado el estudio, la investigación y el desarrollo a nivel micro y nano en todos esos ámbitos.

Al ser uno de los instrumentos más importantes en los laboratorios, escuchar sobre la existencia de un cuarto limpio se vuelve cada vez más común, se considera como una de las herramientas primordiales en las investigaciones científicas, debido a que contiene muchos beneficios e incrementa el desarrollo y evolución de resultados.

Según (Naughton, 2019), la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), menciona que “la aplicación de cuartos limpios se ha convertido en un método común para controlar la contaminación y mejorar el entorno para la gente, el equipo y los materiales” Por otra parte, la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2015), afirma que “el control de contaminación puede ser beneficioso para la protección de la integridad de los productos o procesos en aplicaciones en industrias como la aeroespacial, microelectrónica, farmacéutica, dispositivos médicos, de la salud y alimentaria”.

Se aborda este tema de una manera más profunda, enfocándose en la aplicación y las técnicas que conllevan a un uso adecuado, y en el avance de estos instrumentos para el desarrollo de proyectos de cualquier índole, destacando así sus beneficios dentro de algunos centros de investigación y laboratorios en el país.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La razón principal por la cual se eligió el método descriptivo es para responder a la interrogante sobre los beneficios de la fabricación de MEMS en México con el uso de los cuartos limpios, motivo por el cual se recopilaron varias normas de estandarización internacionales y nacionales, así como antecedentes y datos relevantes proporcionados por empresas desarrolladoras de cuartos limpios.

Asimismo, se hace uso de las facultades descriptivas de la información, algunos usos de símiles y de explicaciones de causa-efecto, que permitan explicar los fenómenos del objetivo de este documento. Se respalda en técnicas como la observación, las opiniones, los registros y la sociometría.

Por último, se utilizan las herramientas de la explicación inductiva, partiendo de lo particular a lo general, basándose en la recolección de datos para poder crear nuevas teorías y dar paso a futuras investigaciones.

## RESULTADOS

### 1. DEFINICIÓN DE CUARTOS LIMPIOS

El estándar federal estadounidense (ahora obsoleto) los define como una habitación en la cual, la concentración de partículas en el aire es controlada para límites específicos (IEST, 2001).

La norma británica BS 5295 los define como una habitación con control de contaminación de partículas, elaborada y utilizada de manera tal que se minimice la introducción, generación y retención de partículas en el interior del cuarto, y en el cual la temperatura, humedad, patrones de flujo de aire, movimiento del aire y presión son controlados (Airplan, 2021).

Si bien las dos definiciones anteriores eran las más aceptadas, eran estándares de aplicación local, (la FS 209E de EE. UU. y el estándar 5295 del Reino Unido), por lo cual se introdujo el protocolo ISO 14644-1 de cuartos limpios de la Organización Internacional de

Estandarización, que es la clasificación mundialmente aceptada para designar los niveles de limpieza en estas áreas.

Por lo tanto, la (ISO, 2015) define los cuartos limpios, como un cuarto en el cual la concentración de partículas en el aire es controlada, y la cual es elaborada y utilizada de manera que se minimice la introducción, generación y retención de partículas en el interior del cuarto y en el cual otras partículas y parámetros relevantes, como temperatura, humedad y presión son controlados como sea necesario.

## 2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS CUARTOS LIMPIOS

De acuerdo con la revista (Cleanroom Industry, 2019), un cuarto limpio limita el riesgo de contaminantes. Estos incluyen polvo, vapores químicos, microbios, y otras impurezas en el aire; también se controla la temperatura y la humedad. Los cuartos limpios protegen equipo que es susceptible a las partículas en el aire. Los contaminantes incluso podrían destruir equipo como nanotecnologías, productos farmacéuticos, semiconductores, equipo eléctrico y médico, entre otros. Cuando los cuartos limpios implementan los estándares adecuados, se crea un ambiente de trabajo efectivo y seguro.

La empresa desarrolladora de cuartos limpios (Airplan, 2021), resume algunas de las características de los cuartos limpios en los siguientes puntos:

- El aire que entra en el laboratorio es filtrado para eliminar partículas en suspensión y microorganismos, y se va renovando completamente para no acumular polvo.
- En los cuartos limpios se mantiene el aire libre de partículas a través de filtros de aire de partículas de alta eficiencia (HEPA) que atrapan partículas de 0.3 micrones y más grandes. Todo el aire que entra a los cuartos limpios pasa a través de los filtros HEPA y, cuando es necesario un rendimiento de limpieza estricto, se utilizan filtros de aire de partículas ultra bajas (ULPA).
- La presión de los cuartos limpios es ligeramente superior a la del exterior, para evitar que pueda entrar aire del exterior (contaminado con microorganismos) al abrir las puertas.
- Las esclusas mantienen las diferencias de presión entre los cuartos y las aíslan del exterior.

- El objetivo siempre es que el aire filtrado fluya de los espacios más limpios a los menos limpios. En cuarto limpio de cámaras múltiples, el cuarto más limpio tendrá la presión más alta. Los niveles de presión entre los cuartos se establecen para que el aire más limpio fluya hacia los espacios con aire menos limpio.

- Dos cuartos de ambiente controlado con la misma clasificación pueden necesitar un desarrollo con tecnologías y materiales constructivos totalmente diferentes, según sus dimensiones, ámbito de aplicación, flujos, carga de trabajo, etc.

### 3. ANTECEDENTES DE LOS CUARTOS LIMPIOS

#### ANTECEDENTES

Aunque los fundamentos de los cuartos limpios se remontan a más de 150 años a los inicios del control de bacterias en los hospitales, el cuarto limpio como tal es relativamente un desarrollo moderno. La necesidad de un entorno limpio para la producción industrial durante los años 50 fue lo que condujo a los cuartos limpios actuales.

Como lo expone la revista (*Cleanroom Industry*, 2013), Louis Pasteur, un químico francés, descubrió la importancia de la relación entre las partículas más pequeñas, conocidas como microorganismos, y los efectos que causaban en la gente, en la comida y en las enfermedades. Él descubrió que las bacterias eran responsables de que se agriaran las bebidas como la leche, el vino y la cerveza. Pasteur descubrió que hervir el agua y la exclusión del aire detenía la descomposición en la carne.

Las primeras instancias de cuartos limpios se pueden encontrar en los quirófanos dentro de los hospitales. El cirujano británico Joseph Lister, un pionero de la cirugía antiséptica fue el primero en apoyar la idea de la cirugía estéril. Después de estudiar el trabajo de Pasteur, Lister descubrió que al usar ácido carbólico en las heridas producía resultados antisépticos y en 1867, lo comenzó a usar en cirugía. Lister observó los resultados positivos y empezó a usar ácido carbólico para limpiar sus instrumentos quirúrgicos y para lavarse las manos. Descubrió que tomar estas medidas reducía la infección y eliminaba las bacterias. Esta fue la primera vez que se hacía un esfuerzo consciente para controlar un entorno. Posteriormente Lister incorporó los aerosoles antisépticos en sus prácticas quirúrgicas, pero esto no controlaba los contaminantes aéreos.

(Fernandez, 2020) comenta que el punto de inflexión en la historia de los cuartos limpios fue el invento del primer “flujo laminar” o el verdadero concepto unidireccional de ventilación en 1960-1961 por el físico Willis Whitfield en los laboratorios Sandía en Albuquerque, Nuevo México, mientras trabajaba para la Comisión de Energía Atómica de los EE. UU. (AEC). Esto fue gracias a que se atacaron los tres principales problemas que presentaban los cuartos limpios de la época: primero, que no tenían la capacidad de auto limpieza para contrarrestar la contaminación que el personal traía al cuarto; segundo, que los patrones del flujo de aire no eran uniformes ni dirigidos de manera que se llevara las partículas de las áreas críticas de trabajo; y tercero, que debido a que el personal en un cuarto limpio convencional contribuía en gran parte a la contaminación del cuarto, se requerían controles estrictos del personal. El éxito del cuarto limpio de flujo laminar se propagó rápidamente a otras agencias y contratistas de productos militares y espaciales.

(Naughton, 2019) concluye sobre los cuartos limpios en la actualidad, que los diseños de climatización han sufrido cambios desde el primer cuarto limpio de “flujo laminar” de Whitfield, pero su idea principal de cuartos limpios con auto limpieza ha permanecido igual. Los cuartos limpios unidireccionales aún se basan en el movimiento del aire vertical u horizontal. Las industrias como las de semiconductores y microelectrónica crearon cuartos limpios unidireccionales verticales de múltiples niveles para acomodar sus requerimientos de procesos complejos. La propagación de las aplicaciones de cuartos limpios propició la creación de industrias enfocadas en el diseño y fabricación de cuartos limpios y sus componentes.

**Figura 1. avances científicos y tecnológicos de las últimas décadas a finales del milenio**



En esta figura (Bouie, 2011) se pueden apreciar a grandes rasgos los diferentes avances científicos y tecnológicos de las últimas décadas a finales del milenio.

**Tabla 1. Línea de tiempo de las normas internacionales**

Año	Estándar Internacional		
1960s	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuerza Aérea EE. UU. TO 00-25-203</li> <li>US-MIL-STD-1246</li> <li>Estándar Federal EE. UU. 2019</li> <li>Estándar Federal EE. UU. 209A</li> </ul>		
	1970s	<ul style="list-style-type: none"> <li>Federal Standard 209B</li> <li>Estándar Australiano AS 1386</li> <li>Estándar Británico BS 5295</li> <li>Estándar Japonés JIS B 9920</li> <li>Estándar Francés AFNOR 44101</li> <li>Estándar Alemán VDI 2083:3</li> <li>Estándar Holandés VCCN 1</li> </ul>	
		1980s	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estándar Federal EE. UU. 209C</li> <li>Estándar Federal EE. UU. 209D</li> </ul>
			1990s
2000s		<ul style="list-style-type: none"> <li>ISO 14644-3</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 14644-4</li> <li>• ISO 14644-5</li> <li>• ISO 14644-6</li> <li>• ISO 14644-7</li> <li>• ISO 14644-8</li> <li>• ISO 14644-9</li> </ul>
<b>2010s</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 14644-1 (2015)</li> <li>• ISO 14644-2 (2015)</li> <li>• ISO 14644-10</li> <li>• ISO 14644-11</li> <li>• ISO 14644-12</li> <li>• ISO 14644-13</li> <li>• ISO 14644-14</li> <li>• ISO 14644-15</li> <li>• ISO 14644-16</li> <li>• ISO 14644-17</li> </ul>

Fuente: (Naughton, 2019)

a. ISO 14644

Como ya se ha mencionado anteriormente, la ISO 14644 es el estándar internacional más aceptado a nivel mundial; además esta norma no solo define a los cuartos limpios, sino que también regula otros importantes aspectos de estos mediante varias partes en las que se divide.

Parte 1: Clasificación de la limpieza del aire; parte 2: Especificaciones para los ensayos; parte 3: Métodos de ensayo; parte 4: Diseño, construcción y puesta en marcha; parte 5: Funcionamiento; parte 6: Terminología; parte 7: Dispositivos de separación; parte 8: Contaminación molecular del aire; parte 9: Clasificación de la limpieza de superficies; parte 10: Contaminación química (superficies); y la parte 12: Clasificación por concentración de nano partículas (ISO, 2015).

b. NORMAS NACIONALES (NOM)

En México existen tres normas de carácter nacional que regulan ciertos aspectos en torno a los cuartos limpios:

La NOM-059-SSA1-2015 publicada en el (DOF, 2016), es la Norma Oficial Mexicana, encargada de regular las buenas prácticas de fabricación (BPF) de medicamentos. Su objetivo es establecer los requisitos mínimos y especificaciones tales como temperatura,

humedad y la calidad de aire entre otros, que se deben cumplir para la fabricación de medicamentos en nuestro País. Su campo de aplicación es la observancia obligatoria para todos los establecimientos dedicados a la fabricación y/o importación de medicamentos para uso humano comercializados en el país y/o con fines de investigación, así como los laboratorios de control de calidad, almacenes de acondicionamiento, depósito y distribución de medicamentos y materias primas para su elaboración.

El Apéndice A de la NOM-059-SSA1-2015 indica el grado de calidad de aire mínimo requerido que se necesita de acuerdo al tipo de producto a fabricar. El tipo de vestimenta requerida para ingresar a cada tipo de área, que es otro factor importante que puede afectar la calidad del producto que la NOM-059-SSA1-2015 describe y regula en los subíndices 7.6.4 al 7.6.7.

La NOM-241-SSA1-2012, publicada en el (DOF, 2012), es la Norma Oficial Mexicana encargada de las buenas prácticas de fabricación para establecimientos dedicados a la fabricación de dispositivos médicos. Esta norma establece los requisitos que deben reunir los procesos, desde el diseño de la instalación, desarrollo, obtención, preparación, mezclado, producción, ensamblado, manipulación, envasado, acondicionamiento, estabilidad, análisis, control, almacenamiento y distribución de los dispositivos médicos comercializados en el país, por el tipo de insumo de que se trate; y tiene por objeto asegurar que éstos cumplan consistentemente con los requerimientos de calidad y funcionalidad para ser utilizados por el consumidor final o paciente.

También regula el diseño y construcción de un establecimiento dedicado a la producción, acondicionamiento, almacenamiento de dispositivos médicos. Por ejemplo, menciona que el área donde se realicen llenados asépticos y/o pruebas de esterilidad deben clasificarse como ISO-Clase 5; las áreas adyacentes a las áreas donde se realizan llenados asépticos y/o pruebas de esterilidad, deben cumplir como mínimo con ISO-Clase 7; los procesos de producción, ensamblado y/o envasado de dispositivos médicos en los que las condiciones ambientales puedan tener un efecto adverso en la calidad del producto deben cumplir como mínimo con ISO-Clase 9.

Finalmente, la NOM-249-SSA1-2010 publicada en el (DOF, 2010) es la Norma Oficial Mexicana encargada de las mezclas estériles: nutricionales y medicamentosas, e

instalaciones para su preparación. Esta norma establece los requisitos mínimos necesarios para la preparación y dispensación de mezclas estériles: nutricionales y medicamentosas, por prescripción médica para utilizar o administrar mezclas de calidad a los pacientes, así como los requisitos mínimos necesarios que deben cumplir todos los establecimientos dedicados a su preparación y dispensación, por ejemplo, la calidad del aire en los cuartos limpios y vestidores se debe evaluar por personal calificado para que cumplan con los requerimientos de calidad cada 6 meses y cada vez que haya modificaciones.

#### 4. CLASIFICACIÓN DE LOS CUARTOS LIMPIOS

##### a. POR LA CALIDAD DEL AIRE (NORMAS INTERNACIONALES)

El Centro de Ciencias de Nano escala e Ingeniería (CENSE, 2021) del Colegio de Ingeniería de Reino Unido muestra en la siguiente tabla, la clasificación de los cuartos limpios según el máximo de partículas en el aire por metro cúbico; además, muestra un comparativo entre las normas ISO 14644 y el estándar federal estadounidense 209E, y con ello se pueden apreciar las diferencias que existen entre las normas anteriores y las actuales, ya que hoy en día las exigencias en la limpieza del aire son mayores.

**Figura 2. ISO 14644-1 Cuartos limpios estándar**

ISO 14644-1 Cuartos Limpios Estándar							
Clasificación	Máximo de partículas / m <sup>3</sup>						Equivalente FED STD 209E
	≥0.1µm	≥0.2µm	≥0.3µm	≥0.5µm	≥1µm	≥5µm	
ISO 1	10	2.37	1.02	0.35	0.083	0.0029	
ISO 2	100	23.7	10.2	3.5	0.83	0.029	
ISO 3	1,000	237	102	35	8.3	0.029	Clase 1
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83	2.9	Clase 10
ISO 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29	Clase 100
ISO 6	1.0 x 10 <sup>6</sup>	237,000	102,000	35,200	8,320	293	Clase 1,000
ISO 7	1.0 x 10 <sup>7</sup>	2.37 x 10 <sup>6</sup>	1,020,000	352,000	83,200	2,930	Clase 10,000
ISO 8	1.0 x 10 <sup>8</sup>	2.37 x 10 <sup>7</sup>	1.02 x 10 <sup>7</sup>	3,520,000	832,000	29,300	Clase 100,000
ISO 9	1.0 x 10 <sup>9</sup>	2.37 x 10 <sup>8</sup>	1.02 x 10 <sup>8</sup>	35,200,000	8,320,000	293,000	Aire de la habitación

Fuente: (CENSE, 2021)

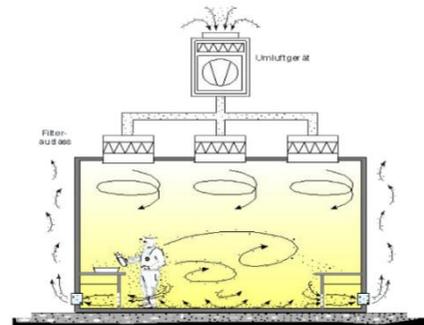
### i. POR EL TIPO DE FLUJO DE AIRE UTILIZADO

El flujo de aire determina la dirección en la que el aire se mueve dentro de un recinto, de acuerdo de la aplicación se puede configurar este flujo en flujo de aire unidireccional o laminar o flujo de aire no direccional o turbulento (ABACO, 2021).

Los cuartos limpios deben cumplir con ciertos parámetros que aseguren el control de partículas dentro de ellos. Para ello se contempla elementos como temperatura, humedad, presión, aire exterior, iluminación, control microbiológico y filtros. Dentro de estos, existen cuatro tipos de cuartos limpios (AEN, 2021):

#### Convencional

A este tipo de cuartos limpios también se les conoce como turbulentamente ventilados y se caracterizan por la forma en que entra el aire de suministro por medio de difusores o filtros instalados en el cielo suspendido.



#### Flujo Unidireccional

También conocido como flujo laminar, donde el aire limpio de suministro pasa por un banco de filtros de alta eficiencia, en forma unidireccional a través del cuarto.



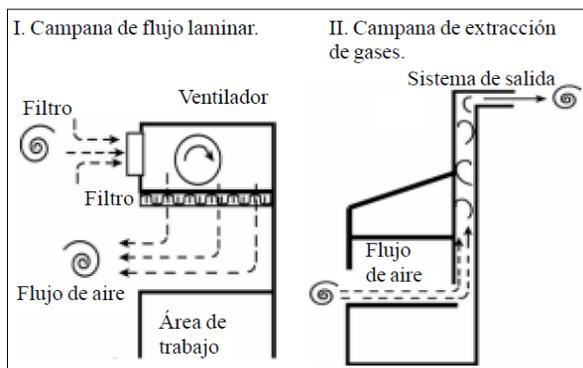
#### Flujo Mixto

Este tipo de cuarto limpio es ventilado de una forma convencional con excepción de áreas donde el producto sea expuesto a contaminación; en este caso, se utilizan cabinas con flujo unidireccional.

#### Microambiente

Se utilizan dentro de un cuarto limpio para garantizar la máxima protección contra la contaminación mediante el flujo de aire turbulento (no unidireccional) y flujo de aire laminar (unidireccional).

En áreas de trabajo críticas para la fabricación de microcircuitos, dentro del cuarto limpio debe haber campanas de flujo laminar para darle un cuidado aún mayor que el del cuarto mismo donde se encuentra y evitar que se afecte el desempeño del dispositivo (Pedroza, 2012).



#### b. POR LAS INDUSTRIAS QUE LOS UTILIZAN

La empresa mexicana desarrolladora de cuartos limpios (AEN, 2021), los clasifica según el estándar internacional ISO 14644 y el estándar federal estadounidense 209E de la siguiente manera:

- Circuitos integrados y de geometrías de sub-micrón (ISO 3 = FED STD 209E = 1).
- Productores de semiconductores que crean circuitos integrados con anchos de líneas inferiores a 2 micras (ISO 4 = FED STD 209E = 10).
- Manufactura de medicinas inyectables producidas de manera aséptica (ISO 5 = FED STD 209E = 100).
- Manufactura de equipo óptico de alta calidad, ensamble y prueba de precisión de giroscopios y ensamble de rodamientos miniatura (ISO 6 = FED STD 209E = 1,000).
- Ensamble de equipo hidráulico o neumático, válvulas de servo-control, dispositivos de medición de tiempos y engranajes de alto grado (ISO 7 = FED STD 209E = 10,000).
- Trabajo general de óptica, ensamble de componentes electrónicos y ensamble hidráulico y neumático (ISO 8 = FED STD 209E = 100,000).

#### 5. CUARTOS LIMPIOS EN LAS INDUSTRIAS A NIVEL INTERNACIONAL

Según la empresa desarrolladora de cuartos limpios (Airplan, 2021), los cuartos limpios se utilizan prácticamente en todas las industrias donde las partículas pequeñas pueden afectar negativamente al proceso de fabricación. Encontramos cuartos limpios o de ambiente controlado en las siguientes industrias:

- Industria electrónica: Ordenadores, televisores, etc.
- Industria de semiconductores: Producción de circuitos integrados, etc.
- Industria micromecánica: Giróscopos, etc.
- Industria óptica: Equipos láser, lentes, etc.
- Industria química: Producción de materias primas para la industria farmacéutica, etc.
- Industria farmacéutica: Investigación y desarrollo, producción, etc.
- Industria de equipos médicos: Válvulas cardíacas, sistemas by-pass, etc.
- Industria alimentaria: Comida y bebida procesada, producción de bebidas, etc.
- Hospitales y clínicas: Terapias inmunodeprimidos, quirófanos, etc.

Asimismo, la empresa desarrolladora de cuartos limpios (LWS, 2021), menciona las siguientes categorías: La industria automotriz, aeroespacial, militar, de investigación, energía solar, cosméticos y perfumes, ciencias de vida, entre otras.

Finalmente, la empresa italiana desarrolladora de cuartos limpios (Delta-2000, 2021), concluye que, en todas estas industrias, los cuartos limpios persiguen una alta pureza del aire, la diferencia entre una aplicación u otra reside en si se quiere proteger al producto, al operador, al ambiente o combinaciones de ellos. Por ejemplo, en la industria electrónica, de semiconductores y óptica, se suele buscar la protección del producto contra partículas que interfieran, mientras que en industria farmacéutica y química se debe proteger al producto, pero también al operario y al ambiente.

## 6. PANORAMA ACTUAL DE LOS CUARTOS LIMPIOS EN MÉXICO

Con datos tomados del último reporte de (360iResearch, 2021), en 2020 el tamaño del mercado de tecnologías de cuartos limpios en México estaba valuado en \$164.66 millones de dólares, y se pronostica que alcance \$172.34 millones de dólares en 2021, con un crecimiento anual de 7.18% y así alcanzar los \$249.69 millones para el 2026.

En cuanto a la segmentación de mercado y cobertura, el estudio del mercado de tecnologías de cuartos limpios se estudió por cuartos limpios de estructura rígida, armarios secos, cuartos limpios de estructura suave, y cuartos limpios estándar. Este último segmento tuvo el mayor tamaño del mercado en 2020, seguido por el de estructura suave. Por otra parte, se espera que los cuartos limpios de estructura suave tengan el mayor ritmo de crecimiento anual durante los siguientes 5 años, seguido de los armarios secos.

Basado en el tipo de producto, el mercado se divide en bienes de consumo, controles y equipo. Dentro de los bienes de consumo están los bienes de limpieza y de seguridad. Dentro del segmento de equipo se encuentran los difusores de aire y regaderas, unidades de filtro de ventiladores, filtros HEPA, sistemas HVAC, y sistemas laminares de flujo de aire y armarios de bioseguridad. El mayor tamaño del mercado lo ocupó el segmento de bienes de consumo en 2020, seguido por el de equipo. Asimismo, se espera que el segmento de bienes de consumo tenga el mayor crecimiento anual por los siguientes 5 años, seguido por el de controles.

Finalmente basándose en el usuario final, el estudio de mercado se realizó mediante la industria de biotecnología, hospitales, fabricantes de equipo médico, y la industria farmacéutica. Los hospitales tuvieron el mayor segmento del mercado en 2020, seguido por la industria farmacéutica. De la misma forma, se espera que los hospitales tengan el mayor crecimiento anual durante los próximos 5 años, seguido de los fabricantes de equipo médico.

## 7. MICRO DISPOSITIVOS ELECTROMECAÑICOS (MEMS)

### a. DEFINICIÓN

Las MEMS, son mejor conocidas como elementos mecánicos de escala micrométrica que interactúan con fenómenos físicos o químicos que, mediante la transducción de señales eléctricas, relacionan el comportamiento del dispositivo con los fenómenos a los que es expuesto (Ramos, 2016)

También otros autores lo definen como es que se trata de sistemas embebidos y especializados en miniatura que involucran uno o más componentes o estructuras micro maquinadas que actúan como sensores o actuadores para habilitar funciones en un nivel superior dentro de la estructura de un sistema más complejo.

## b. CARACTERÍSTICAS

Se entiende como un sistema formado de microestructuras, microsensores, microelectrónica y micro actuadores que trabajan en conjunto. En particular, el diseño y la tecnología de MEMS ofrecen fundamentalmente los beneficios de escalar en dominios físicos más allá del dominio eléctrico, para incluir los dominios mecánico, químico y biológico.

Dentro de los cuales surgen diferentes categorías, como lo son: Sensores, Actuadores, Radiofrecuencia, Ópticos, micro fluidos y bio. La naturaleza del microsistema puede ser eléctrica, magnética, óptica, térmica, mecánica o fluidica. La arquitectura del microsistema incorpora circuitos electrónicos y/u ópticos, generadores de señal y receptores, microsensores, micro actuadores y micro generadores (Marquez, 2006).

Se destacan los siguientes beneficios:

- Velocidad más rápida.
- Menos consumo de energía.
- Mayor complejidad funcional, mediante circuitos integrados mediante enlaces.

Asimismo, se comparten las funciones más básicas de los MEMS:

- Detección de parámetros que incluyen variables inerciales.
- Control de variables físicas.
- Generación y/o entrega de cantidades físicas útiles.

## c. CUARTOS LIMPIOS EN LOS LABORATORIOS DE MEMS EN MÉXICO

La Red de Cuartos Limpios México (RCLM, 2021), es un grupo de centros de investigación y universidades en México con las capacidades de cuartos limpios para la fabricación de Micro dispositivos. Ellos definen a los cuartos limpios como laboratorios especializados en la fabricación de dispositivos y sistemas "micrométricos y nanométricos" normalmente utilizados en la industria semiconductora para la creación de circuitos integrados. Su objetivo es dar a conocer a la comunidad científica y tecnológica las capacidades de cuartos limpios que existen en México para el aprovechamiento de la

infraestructura y desarrollo de proyectos de alto impacto tecnológico. La Red está conformada por Instituciones que incluyen 4 centros CONACYT (CIDESI, INAOE, CIO y CIDETEQ), 4 de las Universidades Públicas más grandes de México (IPN, UNAM, BUAP y UACJ) y 3 Laboratorios Nacionales (SEDEAM, LaNNaFab y LABMyN).

#### i. CENTROS CONACYT

##### 1. CIDESI

El Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI, 2021), fue fundado el 9 de marzo de 1984; pertenece al Sistema de Centros del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT; contribuye al desarrollo del sector productivo del país, a través de proyectos de Investigación e Innovación, así como servicios tecnológicos especializados de alto nivel, en sus instalaciones ubicadas en los Estados de Querétaro, Nuevo León, dentro del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica y en el Estado de México.

La Dirección de Microtecnologías está compuesta por un cuerpo de tecnólogos liderando la investigación, desarrollo y operación de sus laboratorios. Asimismo, la Dirección se apoya en la amplia red de colaboración científica que abarca las principales universidades, centros de investigación y laboratorios nacionales de México y el extranjero. Sus áreas de desarrollo son: desarrollo de sensores base, sensores emergentes y sensores de aplicación; desarrollo de dispositivos microelectromecánicos MEMS; circuitos integrados basados en tecnología MOS de silicio cristalino y polisilicio; diseño físico de layouts para tecnologías de semiconductores estándar; servicios de depósito y caracterización de materiales para la industria semiconductor.

##### 2. CIO

El Centro de investigaciones en Óptica (CIO, 2021), desarrolla investigación básica y aplicada que contribuye a la generación de conocimiento e innovación en el campo de la óptica y fotónica, fortaleciendo el liderazgo tecnológico del país y promueve la formación de nuevas empresas basadas en el conocimiento. Ofrece el mejor programa de posgrado en óptica y fotónica y contribuye al desarrollo de una cultura científica y tecnológica.

El CIO cuenta con 41 laboratorios: de sensores ópticos y microdispositivos; de dispositivos biofotónicos; de fabricación de dispositivos fotónicos; de percepción y robótica;

de óptica no lineal y fotofísica; de pruebas ópticas no destructivas; de caracterización de materiales; de biofotónica; de conversión fotónica en fibras ópticas; de fotónica cuántica; de estación de grabado de rejillas con UV; de pruebas ópticas y mecánicas; de láseres; de espectroscopía; de holografía; por mencionar algunos.

### 3. INAOE

El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE, 2021), fue creado por decreto presidencial el 11 de noviembre de 1971 como un organismo descentralizado, de interés público, con personalidad jurídica y patrimonio propio, ubicado en Tonantzintla, Puebla, para preparar investigadores, profesores especializados, expertos y técnicos en astrofísica, óptica y electrónica; procurar la solución de problemas científicos y tecnológicos relacionados con las citadas disciplinas; y orientar sus actividades de investigación y docencia hacia la superación de las condiciones y resolución de los problemas del país.

La coordinación de electrónica cuenta con varios laboratorios de alta tecnología, como son los laboratorios de altas frecuencias, comunicaciones ópticas, crioelectrónica, diseño de circuitos integrados, diseño de MEMS, instrumentación, microelectrónica, microscopía electrónica, procesamiento digital de señales, y pruebas y caracterización de circuitos integrados. En estos laboratorios se desarrollan tanto los proyectos de investigación como la capacitación de los estudiantes en el uso de software y equipo especializado.

### 4. CIDETEQ

El Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ, 2021), fue creado como centro público de investigación en septiembre de 1991, con el propósito fundamental de vincular a los investigadores con el reto de responder a la necesidad de vincular la industria con la academia y la investigación. Los ejes de desarrollo del CIDETEQ son la formación de recursos humanos, fomentar la colaboración de la industria con el área productiva del país e instituciones científicas y proporcionar servicios tecnológicos en los sectores, automotriz, aeroespacial, agua y materiales; ofreciendo proyectos, servicios y soluciones basados en normas nacionales e internacionales.

Las áreas en las que se enfocan son: agua y medioambiente, energía y salud; para las cuales cuentan con un laboratorio de análisis químico; una sala de fabricación automatizada

de superficies reflejantes; un laboratorio de sistemas electroquímicos de energía; plantas piloto para la producción de biocombustibles; y áreas de estudio para reactividad de sistemas biológicos; ensamblado de arquitecturas para la generación de sensores y biosensores; y construcción de dispositivos microfluídicos para detección en línea.

## 5. CIMAV

El Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV, 2021), es una de las 27 instituciones coordinadas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT. Fue creado el 25 de octubre de 1994 en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, donde también se encuentra su sede. La institución cuenta con dos unidades académicas localizadas en Monterrey, Nuevo León, y en Durango, Durango, además de una oficina de representación establecida en Ciudad Juárez, Chihuahua.

Cuenta con los siguientes laboratorios: análisis mecánico de materiales, análisis metalográfico y microscopía óptica, análisis químicos, análisis térmico, caracterización de materiales poliméricos, espectroscopía RAMAN, laboratorio de espectroscopías y tamaño de partícula, microscopía de fuerza atómica, microscopía electrónica de barrido, microscopía electrónica de transmisión, procesamiento de polímeros, rayos-x, recubrimientos por espray, síntesis de películas delgadas, xps, auger y ups; entre otros.

## 6. CINVESTAV

El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN unidad Querétaro (CINVESTAV, 2021), tiene por misión, desarrollar investigación y tecnología multidisciplinaria y de vanguardia en el área de la ciencia e ingeniería de materiales, que garanticen la formación de recursos humanos de alta calidad y que con vocación clara de vinculación con los sectores productivos y social, contribuya de manera destacada al desarrollo del país.

Cuenta con 28 laboratorios: Propiedades eléctricas, difracción de rayos x, espectroscopía RAMAN y efecto hall, materiales y dispositivos para medio ambiente y energía, química de materiales, crecimiento de películas delgadas semiconductoras, energías alternas, procesamiento de materiales orgánicos, propiedades ópticas de películas delgadas, materiales nanoestructurados y caracterización electroquímica, materiales compuestos,

polímeros y biomateriales, procesamiento químico de películas, simulación y análisis de procesos, preparación de muestras metalográficas, polvos metálicos, cerámicos multifuncionales, LIDTRA (microscopía), propiedades multifuncionales nanométricas, propiedades de transporte térmico, energías alternativas, películas delgadas y recubrimientos, reología, propiedades fisicoquímicas, análisis térmico por DSC y análisis elemental por ICP-OES, procesamiento y caracterización de nanopelículas (LPCN), optoelectrónica terahertz, tecnologías cuánticas para comunicaciones avanzadas, entre otros.

## ii.UNIVERSIDADES

### 1. Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional (IPN)

El Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías (CNMN, 2021), abrió sus puertas a usuarios a partir del año 2009 brindando servicios de apoyo a la investigación, al sector académico, público, gubernamental e industrial; su objetivo es impulsar la investigación en las áreas de nanociencias y micro y nanotecnologías, apoyando la generación de nuevos conocimientos científicos de alto impacto y la transferencia de tecnología al sector productivo y ofrecer a los sectores público, social y privado de México y el extranjero, servicios de instrumentación de alta tecnología para el desarrollo de proyectos de investigación científica y desarrollo tecnológico en las áreas de competencia del CNMN.

El laboratorio de micro y nanotecnologías está diseñado para albergar equipos enfocados a la fabricación de micro y nano dispositivos, la integración de dispositivos micro/nano electromecánicos (MEMS y NEMS) y biomicro/nano electromecánicos (bioMEMS y bioNEMS), así como lab-on-chips, en áreas especializadas: 3 salas clase 1000, y 220 m<sup>2</sup> de cuartos limpios clase 100 dividida en dos áreas, las cuales albergan los equipos para fabricación de micro dispositivos, MEMS, bioMEMS, sistemas para microfluidos, depósito de materiales y electrónica flexible.

### 2. Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Los antecedentes del actual Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNYN, 2021), se remontan a la creación del Laboratorio de Ensenada del Instituto de Física (LEIF)

en 1983 a partir del cual se creó el Centro de Ciencias de la Materia Condensada. En agosto de 1998 se inauguró una ampliación al edificio, agregando espacios vitales para su desarrollo: 23 cubículos, 8 laboratorios, biblioteca, taller y cuarto oscuro.

El CNyN de la UNAM cuenta con laboratorios de: ablación láser, catálisis, espectroscopía de superficies, luminiscencia, microscopía de fuerza atómica, nanocaracterización, y XPS de alta resolución. Además, cuenta con las siguientes líneas de investigación: materiales multiferróicos, óptica de materiales y plasma, sulfuros de metales de transición como catalizadores de hidrotratamientos, nanopartículas de metales soportados en matrices nanoestructuradas para desarrollo de materiales nanocatalíticos, estabilización de cúmulos en el interior de zeolitas, materiales luminiscentes, análisis químico de superficies, y espintrónica y transporte electrónico de nanoestructuras.

### 3. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

La Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ, 2021), se constituyó oficialmente el 10 de octubre de 1973, como resultado de la integración del Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada Universidad Femenina, la Universidad de Ciudad de Juárez y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Además, cuenta con un Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada (CICTA), el cual pertenece al consorcio denominado Red MEMS-México. Esta Red tiene el objetivo general de desarrollar conjuntamente proyectos tecnológicos de innovación y transferencia en este tipo de tecnología. Varios miembros de las instituciones que constituyen la Red han sido capacitados en el área de la micro tecnología durante el año del 2003. Esta capacitación ha consistido en participar en varios cursos de especialización de tecnologías MEMS.

La concepción del CICTA fue el contribuir al desarrollo de la ciencia y la tecnología en la región y el país a través de actividades de investigación y desarrollo de proyectos multidisciplinarios en micro y nanotecnología; y promover el desarrollo tecnológico de la industria a través de proyectos asociados a la generación de nuevos productos, prototipos, y optimización de procesos.

Los equipos que actualmente el CICTA utiliza son equipos especiales para el encapsulado y caracterización de microsistemas y equipo para la caracterización avanzada de materiales (microscopio electrónico de barrido.)

#### 4. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

El Instituto de Física de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (IFUAP, 2021), es una unidad académica dedicada a realizar investigación en física y ciencia de materiales; a formar recursos humanos a través de la docencia y sus posgrados, preparando investigadores y especialistas de alto nivel; a impulsar la colaboración con otras dependencias de la propia universidad, así como del país y del extranjero; y a fomentar la difusión nacional e internacional de los conocimientos generados por el instituto. El instituto cuenta con una importante infraestructura de laboratorios de investigación y unidades de servicio para el quehacer científico.

Cuenta con los siguientes laboratorios: Difracción de rayos-X; materiales granulares (GrainsLab); propiedades fotoeléctricas y fotoluminiscentes de materiales; microscopía de fuerza atómica; superconductividad y magnetismo; análisis de superficies; depósito físico de películas delgadas; acústica y óptica en sistemas estructurados; materiales semiconductores para aplicaciones fotovoltaicas; nanomateriales y dispositivos fotovoltaicos; nanoestructuras; electretos y semiconductores; óptica no lineal; crecimiento de materiales ferrícos; estudios cristalográficos; química general; nanoestructuras, nanopartículas y nanocompuestos; entre otros.

#### 5. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH)

La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH, 2021), es una institución reconocida nacional e internacionalmente por su compromiso con la formación de profesionales altamente competitivos y por sus aportes al desarrollo de la ciencia, la innovación tecnológica, el arte y la cultura. Cuenta con los siguientes laboratorios:

Laboratorio de geomática, laboratorio para la conservación y manejo sustentable de los recursos fitogenéticos de Chiapas, laboratorio de ecología evolutiva y análisis espacial de la biodiversidad, laboratorio de académico de investigación y servicios ambientales, laboratorio de cultivo de tejidos vegetales, laboratorio multidisciplinario experimental y

bioferio, banco de germoplasma, laboratorio-taller de educación ambiental y sustentabilidad, laboratorio de acuicultura y evaluación pesquera, laboratorio de genética y biología molecular, laboratorio de fisiología y química vegetal, laboratorio de ecología evolutiva, laboratorio de cultura y conservación biológica, entre otros.

#### 6. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

Formalizada como una universidad bajo el nombre de Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM, 2021) en 1956, la institución encuentra sus inicios en 1828 con la creación del Instituto Literario del Estado de México, en la antigua capital estatal de Tlalpan. En 1943, la institución fue expandida para convertirse en el Instituto Científico y Literario de Toluca (ICLA), y trece años más tarde obtuvo su nombre actual y estatus institucional.

La universidad cuenta con un laboratorio de análisis bioquímico-clínicos. Presta sus servicios desde 1982, se ha enfocado al manejo de altos estándares de calidad que cubren las normas nacionales e internacionales vigentes, lo que conlleva la preparación académica y de certificación del personal garantizando un servicio confiable y vanguardista.

#### 7. Universidad Veracruzana (UV)

La Universidad Veracruzana (UV, 2021), fue fundada en 1944 y adquiere su autonomía en 1996. Se ubica en el estado de Veracruz situado en el Golfo de México. Cuenta con cinco sedes regionales: Xalapa, Veracruz, Orizaba-Córdoba, Poza Rica-Tuxpan y Coatzacoalcos-Minatitlán, con presencia en 27 municipios. Por su matrícula se ubica entre las cinco universidades públicas estatales de educación superior más grandes de México.

Cuenta con un Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA). Previamente inició sus actividades en el 2003 como un Centro de Diseño en Tecnología MEMS (Sistemas Microelectromecánicos); como resultado de una estrategia de desarrollo nacional encabezada por la Secretaría de Economía. En el 2005, el Centro de Diseño MEMS expandió su portafolio de desarrollo hacia el diseño y caracterización, no solo de estructuras MEMS, sino de micro y nanotecnología. Uno de los objetivos principales que persigue MICRONA, está relacionado con el desarrollo de Micro y Nanosistemas, así como la prestación de servicios a clientes, tanto regionales como nacionales, en las áreas de

instrumentación, sensado y automatización de procesos de manufactura industriales; a través del diseño, fabricación e implementación de Micro y Nanosistemas.

### iii.LABORATORIOS NACIONALES

#### 1. SEDEAM

El Laboratorio en Sistemas Embebidos, Diseño Electrónico Avanzado y Microsistemas (SEDEAM, 2021), es un laboratorio nacional de CONACYT enfocado en electrónica avanzada, un área transversal estratégica para el desarrollo científico y tecnológico de diversos sectores industriales y académicos del país. También propicia la generación de empresas de base tecnológica (EBT) en México, además de que atienden la demanda de sectores industriales estratégicos como: Agroindustria, metalmecánica, textil, minería, energías alternativas y renovables, automotriz, turismo, salud y dispositivos médicos, alimentos y bebidas, y tecnologías de la información y comunicación.

Como laboratorio nacional en sistemas embebidos, diseño electrónico avanzado y microsistemas, su misión es impulsar el crecimiento económico de la sociedad.

#### 2. LABMYN

El Laboratorio Nacional de Micro y Nano Fluídica (LABMYN, 2021), con sede en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), en conjunto con la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) y el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), ha sido creado para conformar un laboratorio con la infraestructura y el capital humano que permita el desarrollo de esta línea de investigación a un nivel de competitividad internacional y que promueva el desarrollo industrial de esta tecnología emergente.

Este laboratorio ofrece servicios como: Evaluación prospectiva, diseño y simulación de chips microfluídicos; fabricación de moldes en SU-8 sobre silicio para litografía suave; deposición de capas metálicas delgadas en toda la superficie o con diseños determinados; deposición de metales por pulverización catódica (sputtering) y por evaporación por haz de electrones (e-beam); fabricación de chips microfluídicos en acrílico (PMMA), PDMS o PDMS/vidrio; caracterización de chips microfluídicos por técnicas ópticas y electroquímicas; entre otros.

### 3. LANNAFAB

El Laboratorio Nacional de Nanofabricación (LaNNaFab, 2021), con sede en la Unidad de Nanofabricación (UNaFab) del Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), tiene por objetivo generar conocimiento a través de investigación científica relacionada con el diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones de micro y nano dispositivos, así como formar recursos humanos de alto nivel y ofrecer servicios de vanguardia, a fin de satisfacer las necesidades de los sectores públicos y privados.

Los principales servicios que se ofrecen en el LaNNaFab son: Cursos de capacitación en procesos básicos de fabricación de dispositivos; asesoría en la fabricación de dispositivos a través de procesos de fotolitografía; fabricación de máscaras para procesos de fotolitografía; transferencia de patrones micrométricos a través de máscaras, a materiales que permitan decapado con plasma o por algún tipo de ácido; fabricación de micro dispositivos (prototipos) para electrónica, optoelectrónica y/o óptica integrada; entre otros.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En México son pocos los laboratorios que usan cuartos limpios para la fabricación de MEMS; la red de cuartos limpios la conforman los centros CONACYT, las principales universidades del país, así como los tres laboratorios nacionales; y aunque se pudo observar que existe una gran vinculación por parte de estos agentes con instituciones académicas, dependencias gubernamentales, el sector productivo, y otros agentes internacionales, esto no es del todo suficiente para tener una mayor presencia en los avances tecnológicos y desarrollos científicos; por lo tanto, se requiere de más investigación exhaustiva para conocer el alcance que tiene cada uno de los laboratorios con capacidad para la fabricación de MEMS en México.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

360iResearch. (2021). *Mexico Forecast to 2026, Cumulative Impact of COVID-19*. 360iResearch. doi:<https://www.360iresearch.com/library/research-report/mexico-cleanroom-technology-market>

ABACO. (2021). *Cuartos limpios*. Retrieved from ABACO: <https://abaco.com.co/services/cuartos-limpios/>

AEN. (2021). *Sobre los tipos y clases de cuartos limpios*. Obtenido de Arquitectos Especializados del Noroeste: <https://aen.mx/sobre-los-tipos-y-clases-de-cuartos-limpios/>

Airplan. (2021). *Salas blancas o limpias: Características, diseño, fabricación y normativa*. Retrieved julio 2021, from Airplan: <https://airplan-sa.com/salas-blancas-limpias/>

Bouie, J. (10 de Enero de 2011). Evolution of the Clean Room. *Lab Manager*, 6(1), 32-33. Obtenido de <https://www.labmanager.com/lab-product/evolution-of-the-clean-room-19000#.W0UfFNhKij9>

CENSE. (2021). *Cleanroom*. Retrieved from UK College of Engineering: <https://cense.engr.uky.edu/equipment/cleanroom>

CIDESI. (2021). *Nosotros*. Obtenido de CIDESI: <https://www.cidesi.com/site/desarrollo/microtecnologias-safe/>

CIDETEQ. (2021). *Nosotros*. Obtenido de CIDETEQ: <https://www.cideteq.mx/nosotros/>

CIMAV. (2021). *Acerca*. Obtenido de CIMAV: <https://cimav.edu.mx/acerca/>

CINVESTAV. (2021). *Inicio*. Obtenido de CINVESTAV: <http://qro.cinvestav.mx/>

CIO. (2021). *Laboratorios*. Obtenido de Centro de Investigaciones en Óptica: <https://www.cio.mx/laboratorios.php>

Cleanroom Industry. (14 de febrero de 2013). A Brief History of Cleanrooms. *Cleanroom Industry*, 1. doi:<https://cleanroomindustry.com/a-brief-history-of-cleanrooms/>

Cleanroom Industry. (15 de abril de 2019). What Defines a Cleanroom Environment and How to Achieve It. *Cleanroom Industry*, 1. doi:<https://cleanroomindustry.com/what-defines-cleanroom-environment/>

CNMN. (2021). *Subdirección de Micro y Nanotecnología*. Obtenido de CNMN: <https://www.ipn.mx/nanocentro/micro-y-nanotecnolog%C3%ADas/nanotecnologias.html>

CNyN. (2021). *Historia*. Obtenido de Centro de Nanociencias y Nanotecnología: [https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=79&Itemid=131&lang=en](https://www.cnyn.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=79&Itemid=131&lang=en)

Delta-2000. (2021). *Qué se fabrica en una sala blanca: ¿para qué se utiliza una sala blanca?* Obtenido de Delta-2000 Architectural Solutions for Cleanrooms: <https://www.delta-2000.com/es/profundizacion/que-se-fabrica-en-una-sala-blanca/>

DOF. (27 de diciembre de 2010). Mezclas estériles: nutricionales y medicamentosas, e instalaciones para su preparación. *Diario Oficial de la Federación*, 1. doi:<http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4327/salud/salud.htm>

DOF. (20 de junio de 2012). Buenas prácticas de fabricación para establecimientos dedicados a la fabricación de dispositivos médicos. *Diario Oficial de la Federación*, 1. doi:[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5272051](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5272051)

DOF. (5 de febrero de 2016). Buenas prácticas de fabricación de medicamentos. *Diario Oficial de la Federación*, 1. doi:[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5424575&fecha=05/02/2016](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5424575&fecha=05/02/2016)

Fernandez, M. (01 de Septiembre de 2020). Introduction to History of Cleanrooms. *Pharmaceutical HVAC*, 1. Obtenido de <https://www.pharmaceuticalhvac.com/introduction-to-history-of-cleanrooms/>

IEST. (29 de Noviembre de 2001). *FED-STD-209E*. Obtenido de IEST: <https://www.iest.org/Standards-RPs/ISO-Standards/FED-STD-209E>

IFUAP. (2021). *Acerca del Instituto de Física (IFUAP)*. Obtenido de BUAP: <http://www.ifuap.buap.mx/instituto/acercaif.php>

INAOE. (2021). *Historia*. Obtenido de INAOE: <https://www.inaoe.gob.mx/historia.php?movil=0>

ISO. (2015). *Cleanrooms and associated controlled environments*. Retrieved from International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:14644:-1:ed-2:v1:en>

LABMYN. (2021). *Inicio*. Obtenido de LABMYN: <http://www.labmyn.mx/>

LaNNaFab. (2021). *Inicio*. Obtenido de LaNNaFab: <https://www.cnyn.unam.mx/lannafab/index.php/inicio>

LWS. (2021). *8 Industries That Need A Cleanroom*. Obtenido de Lighthouse Worldwide Solutions: <https://www.golighthouse.com/en/blog/8-industries-that-need-a-cleanroom-460>

Marquez, D. (2006, 08 21). *REDALYC*. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/5075/507550779002.pdf>

Naughton, P. (2019, Noviembre 17). History of Cleanrooms. *ASHRAE Journal*, 61(11), 38-54. doi:[https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/ASHRAE%20Journal/125thAnniversaryArticles/38-54\\_Naughton\\_Historical\\_V2.pdf](https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/ASHRAE%20Journal/125thAnniversaryArticles/38-54_Naughton_Historical_V2.pdf)

Pedroza, A. (octubre-diciembre de 2012). Las salas blancas para microelectrónica como un modelo para evitar infecciones noscomiales. *Asociación mexicana de cirugía del aparato digestivo*, 1(2), 87-92. doi:<http://www.amcad.mx/salas.pdf>

Ramos, C. (2016, 07 15). *INAOE*. Retrieved from <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/346/1/BaezAlCR.pdf>

RCLM. (2021). *Red Cuartos Limpios Mexico*. Obtenido de Red Cuartos Limpios Mexico: <https://cuartoslimpiosmexico.com/>

SEDEAM. (2021). *Servicios*. Obtenido de SEDEAM: <https://www.sedeam.com.mx/servicios>

UACJ. (2021). *Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada*. Obtenido de UACJ: <http://www3.uacj.mx/IIT/CICTA/Paginas/default.aspx>

UAEM. (2021). *Historia*. Obtenido de UAEM: <https://www.uaemex.mx/>

UNICACH. (2021). *Misión y visión*. Obtenido de UNICACH: <https://www.unicach.mx/>

UV. (2021). *Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (Microna)*. Obtenido de UV: <https://www.uv.mx/veracruz/microna/nosotros/historia/>