



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo de un Sistema de  
Instrumentación para determinar la  
morfología del flujo atmosférico en la vía  
pública**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Raúl Rodolfo Gío Hernández

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Alberto Caballero Ruiz



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Agosto 2019**



## Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi familia; al Doctor Raúl Gio por ser siempre un ejemplo de grandeza Académica, a la bióloga Imelda Hernández por ser un ejemplo de virtudes y rectitud, y a mi hermano Rodrigo por siempre enseñarme a buscar un lado alegre a no importa qué situación. A mi tío Isaac, por mostrarme que la pasión por el trabajo de uno puede ante cualquier adversidad y también a toda mi familia materna y paterna por los buenos momentos y apoyos.

A mis colegas de la Universidad: A Ale por siempre apoyarme a lo largo de estos 7 años y a la cofradía del Pan: Pablo, Erick, Emanuel y Perlita. Además de a Cas, Leo, Rafa, Germi, el CapiToño, Charleston y Rose, por estar en las fiestas y también los proyectos.

A mis amigos de toda la vida: Santi, Emlo, Chema, Eggic, Caro, Dani, María, Sara, l'Amig, La Jefa, Cham Choline, Piggy, Julz y Pietro. Y a todos los demás del Lanky que siguen presentes en mi vida. Además de mi hermana puma Magas y a toda su familia. Sin importar las distancias o tiempos, saben que cuentan conmigo para lo que sea.

A los amigos que hice a lo largo de mi formación universitaria: Sofía, Sara, Mijail, el Tocayo, Pablo y Arte, a todas los increíbles alumnos de CNyN con los que compartí varias experiencias inolvidables, a mis amigos de francés del CELE y también a los recientes amigos de PoGo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que me lo ha dado todo desde antes de nacer. A mi bello país México, y al conocimiento generado por todos los científicos a lo largo de la historia humana que me permite presentar este trabajo.

Y finalmente a mi Amigo y modelo a seguir Pablo, por azar del destino no tuvimos más tiempo juntos sin embargo haré mi mayor esfuerzo por tratar de vivir como tu me enseñaste, sin complicaciones y con una actitud desafiante a cualquier adversidad.

“We’re all stories in the end. Just make it a good one, eh?”

The Doctor, 2010.

“If I have seen further it is by standing on the shoulders of Giants.”

Isaac Newton, 1675.

## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a todos en el MADiT especialmente a los Doctores, Alberto Caballero y Leopoldo Ruiz, las Doctoras: Yara, Yare, Rosy, Karen. Además de los estudiantes: Homero, Luis, Juan, Erick, Leo por mencionar a pocos; Al maestro Marcos y también a toda la dirección del ICAT a lo largo de estos ya 4 años de estar ahí.

Asimismo este trabajo no hubiera podido haberse realizado sin el Doctor Arón Jazcilevich y su equipo en el CCA: A Yazmín y a René por los trabajos con los sensores Aura, A Sam y Aurora por todo lo que se logró con los sensores Plantower y al laboratorio de electrónica del CCA. Además de agradecer a Karen por darle más profundidad al proyecto con su propuesta de tesis. Al Área de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM: Wilfrido Gutiérrez López y Manuel García Espinosa

También se aprecia el apoyo económico del proyecto CM-SECITI/063/2018 el cual permitió se realizará este escrito. Agradezco también el apoyo del túnel de viento del Instituto de Ingeniería por apoyar en su momento al proyecto.

El arduo trabajo del equipo liderado por la Doctora Pilar en el CIA y sus estudiantes: Dario, Israel y Carlos por apoyarnos en el trabajo electrónico y de programación.

Al internet por facilitarnos la vida y abrirnos a todo el conocimiento humano y sobretodo a la curiosidad humana que nos impulsa a seguir investigando cómo funciona la realidad.

## Resumen

Este trabajo surge de lo generado por el proyecto SECITI-CCA-MADiT-CIA “Diseño y Construcción de Sistemas para obtener la localización espacio-temporal en tiempo real de monóxido de carbono en áreas urbanas”, el cual midió el impacto de contaminantes en el aire de la Ciudad de México, específicamente, Partículas Suspendidas (PM2.5) y Monóxido de Carbono (CO). Se describe el diseño y construcción de un prototipo útil para adquirir en tiempo real las concentraciones de contaminantes en una acera. Este trabajo se enfoca en el desarrollo de la adquisición de la lectura de los contaminantes y el análisis de los datos por parte de los sensores, específicamente los sensores de CO AirTag de la compañía Cleanspace y PMSA003I de la compañía Plantower de PM2.5. Se desarrollaron las bases para poder generar módulos de 8 sensores los cuales por medio de multiplexores envíen lecturas a un programa donde sean representadas por un mapa de calor. Se hicieron varias iteraciones de estructuras donde se podrían montar estos arreglos algo en lo que también se profundiza, también se caracterizaron dichos sensores con otros de referencia y se muestran los resultados.

## **Introducción**

En el primer capítulo se describen los antecedentes necesarios para comprender la dinámica de los contaminantes que existen en la Zona del Valle de México (ZVM). Se menciona la geografía de la CDMX, los Contaminantes Criterio (CC) y sus afectaciones a la salud. Además de mencionar cómo se miden estos CC, los índices recomendados y las problemáticas de los sistemas actuales.

En el siguiente capítulo, 2, se menciona el objetivo de este trabajo, con sus Alcances y limitaciones. En el Tercer capítulo, se define el Marco Teórico, basándonos en explicar cómo funcionan los sensores en general y posteriormente en profundizar en los sensores de gases. En el Cuarto capítulo se desarrolla la metodología que se utilizó para realizar este proyecto. Definiendo requerimientos y especificaciones, posteriormente enfocándonos primero en el sistema de instrumentación y luego en el sistema mecánico desarrollados.

En el capítulo 5 se hace la evaluación del trabajo desarrollado, profundizando en los experimentos realizados, reportando las pruebas de los experimentos realizados, y finalmente dando conclusiones de los sensores utilizados. Posteriormente se hacen conclusiones del proyecto en general y se profundiza en el trabajo a futuro que se está realizando con base en el proyecto. Finalmente se agrega la bibliografía por si existe la necesidad de profundizar en alguna parte mencionada en alguna parte del texto.

## Tabla de Contenidos

<b>Dedicatoria</b>	<b>2</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Introducción</b>	<b>6</b>
<b>Tabla de Contenidos</b>	<b>7</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>9</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Antecedentes</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Calidad del Aire</b>	<b>11</b>
<b>1.2 La Ciudad de México</b>	<b>12</b>
<b>1.2.1 Índice Metropolitano de la Calidad de Aire, IMECA</b>	<b>14</b>
<b>1.3 ¿Cuáles son los contaminantes criterio?</b>	<b>17</b>
<b>1.3.1 Partículas Suspendidas o Material Particulado (MP).</b>	<b>19</b>
<b>1.3.2 Monóxido de Carbono, CO.</b>	<b>21</b>
<b>1.3.3 Dióxido de Azufre, SO<sub>2</sub>.</b>	<b>22</b>
<b>1.3.4 Los Óxidos de Nitrógeno, NO<sub>x</sub>.</b>	<b>22</b>
<b>1.3.5 COV, precursor de Ozono, O<sub>3</sub>.</b>	<b>24</b>
<b>1.4 ¿Cómo se miden los contaminantes criterio?</b>	<b>26</b>
<b>Capítulo 2</b>	
<b>2.1 Objetivo</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Alcances</b>	<b>29</b>
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Marco Teórico</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Instrumentación y errores</b>	<b>31</b>
<b>3.1.1 Errores no planeados.</b>	<b>34</b>
<b>3.1.2 Errores sistemáticos.</b>	<b>34</b>
<b>3.1.3 Errores por lecturas indirectas.</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Sensores.</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1 Clasificación de Sensores.</b>	<b>37</b>
<b>3.3 Sensores de Gas</b>	<b>39</b>
<b>3.3.1 Sensores Electroquímicos.</b>	<b>39</b>
<b>3.3.2 Sensores Ópticos.</b>	<b>41</b>

<b>Capítulo 4</b>	
<b>Desarrollo</b>	<b>42</b>
4.1.1 Requerimientos	42
4.1.2 Especificaciones	43
4.2 Sistema de Instrumentación	44
4.2.1 Selección de Sensores.	44
4.2.1.1 Google Aclima.	44
4.2.1.2 Sensores de la marca Specs.	45
4.2.1.3 Sensores CleanSpace.	45
4.2.1.4 Sensores Plantower PMSA0031.	47
4.3 Adquisición de Datos.	49
4.4 Caracterización de los Sensores.	53
4.4.1 Aura	53
4.4.2 PMSA003I	56
4.5 Interfaz de Usuario.	59
4.5.1 Aura	59
4.5.2 PMSA003I	61
4.6 Sistema Mecánico.	63
4.6.1 Aura	63
4.6.2 PMSA003I	65
4.7 Fabricación de concepto.	67
4.7.1 Aura	67
4.7.2 PMSA003I	68
<b>Capítulo 5</b>	<b>69</b>
<b>Evaluación</b>	<b>69</b>
5.1 Experimentos Realizados.	69
5.1.1 Aura	69
5.1.2 PMSA003I	70
5.2 Reporte de pruebas.	73
5.2.1 Aura	73
5.2.2 PMSA003I	75
<b>Conclusiones.</b>	<b>79</b>
<b>Trabajo a Futuro</b>	<b>80</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>82</b>

## Lista de tablas

<i>Tabla 1.</i> Relación entre IMECA y concentración real de contaminantes.	12
<i>Tabla 2.</i> IMECA, efectos adversos a la salud y recomendaciones.	13
<i>Tabla 3.</i> Conversión entre estándares de medición de Contaminantes Criterio.	15-16
<i>Tabla 4.</i> Comparación entre estándares de concentración para Material Particulado.	17
<i>Tabla 5.</i> Comparación entre estándares de concentración para Ozono.	23
<i>Tabla 6.</i> Principio de operación de Sensado de Contaminantes Criterio.	24
<i>Tabla 7.</i> Clasificación general de sensores, por principio y aplicación.	34-35
<i>Tabla 8.</i> Experimentos realizados para evaluación y calibración de sensores.	53

## Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Contaminantes aéreos en la CDMX.	10
<i>Figura 2.</i> Mapa de Calor de Altitudes de la ZVM.	11
<i>Figura 3.</i> Dispersión de PM10 en la CDMX.	19
<i>Figura 4.</i> Dispersión de NoX en la CDMX.	22
<i>Figura 5.</i> Emisores de COV en la CDMX.	23
<i>Figura 6.</i> Diagrama de flujo de un proceso de instrumentación.	29
<i>Figura 7.</i> Diagrama explosivo del sensor Cleanspace.	44
<i>Figura 8.</i> Diagrama de flujo del funcionamiento de los sensores Plantower.	45
<i>Figura 9.</i> Diagrama de flujo del funcionamiento de los sensores Cleanspace.	47
<i>Figura 10.</i> Funcionamiento de un sistema de comunicación I2C	48
<i>Figura 11.</i> Diagrama de flujo de la adquisición de datos de los sensores Plantower.	49
<i>Figura 12.</i> Setup del experimento con los sensores Cleanspace.	51
<i>Figura 13.</i> Cámara aislada con los sensores Cleanspace en su caracterización.	52
<i>Figura 14.</i> Gráfica comparativa de sensores de CO.	53
<i>Figura 15.</i> Primera caracterización de los sensores Aura.	55
<i>Figura 16.</i> Gráfica comparativa entre sensores Plantower.	56
<i>Figura 17.</i> Diagrama de flujo de la obtención de datos de los sensores Aura.	57
<i>Figura 18.</i> Cambios aparentes de concentración de PM vistos en pantalla.	60

<i>Figura 19.</i> Propuesta de sistema mecánico, malla.	61
<i>Figura 20.</i> Propuestas de fundas para los sensores.	62
<i>Figura 21.</i> Propuesta de fundas con posibilidad de ser arreglos.	63
<i>Figura 22.</i> Funda final para los sensores de PM.	64
<i>Figura 23.</i> Malla desarrollada como parte del soporte mecánico.	65
<i>Figura 24.</i> Funda desarrollada para embonar con el soporte mecánico.	65
<i>Figura 25.</i> Prototipo funcional.	66
<i>Figura 26.</i> Sensores Aura en la cámara aislada.	67
<i>Figura 27.</i> Primer Experimento con referencia de los sensores Plantower.	69
<i>Figura 28.</i> Segunda Experimento con referencia de los sensores Plantower.	70
<i>Figura 29.</i> Reacción de los sensores Aura a incremento en la concentración de CO.	71
<i>Figura 30.</i> Comparación entre reacciones de los sensores Aura y los de referencia.	72
<i>Figura 31.</i> Primer experimento, Gráfica comparativa entre los sensores Plantower y el pDR de referencia.	74
<i>Figura 32.</i> Segundo experimento, Gráfica comparativa entre los sensores Plantower y el pDR de referencia.	75
<i>Figura 33.</i> Segundo experimento, Gráfica comparativa entre los sensores Plantower.	76

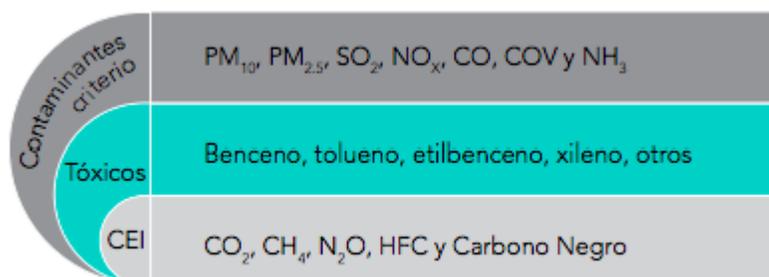
## Capítulo 1

### Antecedentes

#### 1.1 Calidad del Aire

La Calidad del Aire es un indicador elemental de la calidad de vida en megaciudades, como es el caso de la Ciudad de México, CDMX. En la atmósfera hay concentraciones de 78% Nitrógeno, 21% Oxígeno y 1% una combinación de gases, compuestos tóxicos y de efecto invernadero, además de vapor de agua. En ese 1% se encuentran los contaminantes que afectan a los ciudadanos de manera directa, generando problemas de salud, o indirecta, incrementando el calentamiento global. En la *Figura 1* y a continuación se dividen los contaminantes:

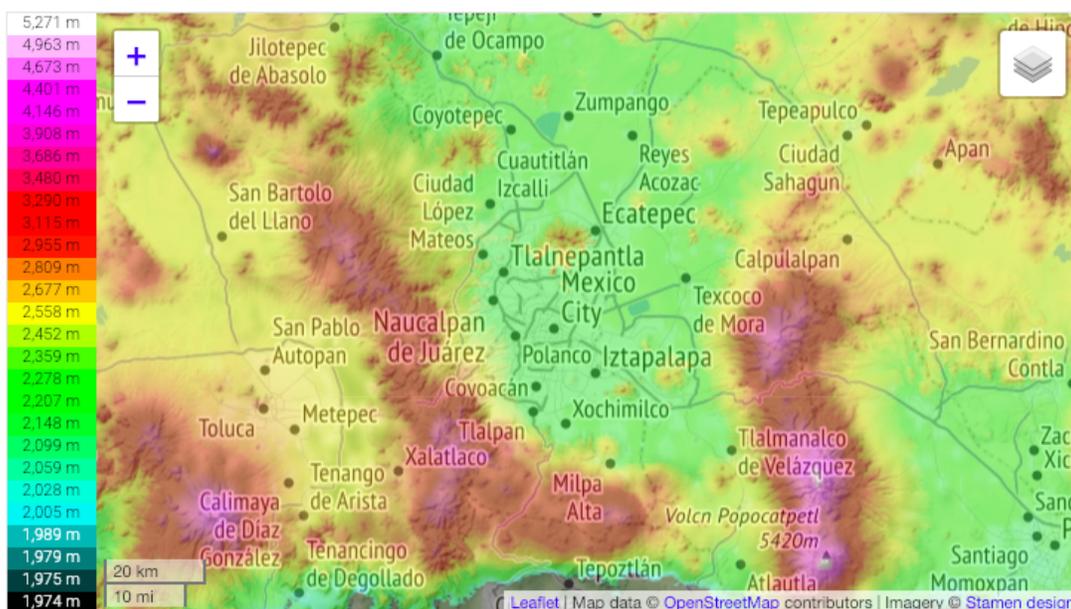
- Los contaminantes de efecto invernadero (CEI), como  $CO_2$ .
- Los tóxicos no normados, que con niveles muy bajos pueden ser nocivos para la salud, como Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos, Xileno, y múltiples más .
- Los Contaminantes Criterio, los cuáles están normados. Cómo:  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,



*Figura 1.* Clasificación de Contaminantes encontrados en la atmósfera. [1]

## 1.2 La Ciudad de México

La Ciudad de México se ubica a una altura promedio de 2240 metros sobre el nivel del mar encima de un lago desecado y está rodeada por montañas y volcanes, como se puede apreciar en la *Figura 2*. Su localización geográfica es de 19°26'32" grados de Latitud Norte y 99°08'47" de Longitud Este. Tiene un clima templado a lo largo del año, con una temperatura media anual de 16 °C. Tiene un número de habitantes cercano a 9 millones, pero si se le agrega el área conurbada la población sobrepasa los 21 millones. De los casi 9 millones de habitantes 21% son niños, 69 % personas con posibilidad de trabajar y 10% adultos mayores. Estos 21 millones de habitantes se desplazan en un área de aproximadamente 1,495 km<sup>2</sup>, la cuál se divide en 80% construcciones y 20% áreas verdes. [2]



*Figura 2.* Relieve del Valle de México mostrando la topografía de la zona [3]

Al tener cerca de un 70% de la población con posibilidades de trabajar, existe una gran demanda para moverse de los hogares a los trabajos, hacer compras del hogar, realizar actividades recreativas y lúdicas por lo que el transporte es esencial en la CDMX . Un problema es que el transporte es una de las principales fuentes de la contaminación atmosférica. Esto se debe a que el 83% de los vehículos en la CDMX son particulares, 8% es público y 9 % es transporte de carga de bienes e insumos. En el año 2016 el transporte utilizó la mayor demanda de energía en la Ciudad de México, con un 61% del total o 234 PetaJoules (1 PetaJoule =  $2.777 \times 10^8$  kW/h) de energía. Esta energía fue procedente de la combustión de gasolina, diesel y turbosina. Si se reparte esto entre los habitantes de la CDMX, tenemos que aproximadamente cada persona utiliza anualmente 1300 litros de gasolina. Ante el problema de la contaminación atmosférica se ideó un sistema para que podamos entender los niveles de contaminación y conocer a lo que los ciudadanos se están exponiendo.[1]

### 1.2.1 Índice Metropolitano de la Calidad de Aire, IMECA

Este índice proporcionado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, y ayuda a comprender los niveles de contaminantes en el medio ambiente de manera sencilla. Este índice se genera una escala del 0-500, donde 0 es la menor concentración y 500 es una concentración no apta para que las personas estén en presencia de este nivel de contaminantes, como se muestra en la *Tabla 1*.

*Tabla 1.* Relación entre el IMECA y las concentraciones de contaminantes criterio, PST = Partículas

Correspondencia entre concentración de contaminante y valores IMECA							
IMECA	Calidad del Aire	PST	PM10	SO2	NO2	CO	O3
		(24hr) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(24hr) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(24hr) ppm	(1hr) ppm	(8hr) ppm	(1hr) ppm
0 -100	Satisfactoria	260	150	0.13	0.21	11	0.11
101 - 200	No satisfactoria	546	350	0.35	0.66	22	0.23
201 - 300	Mala	627	420	0.56	1.1	31	0.35
301 - 500	Muy Mala	1000	600	1.00	2.0	50	0.60

Fuente: SEMARNAP / INE / CENICA. **Primer informe sobre la calidad del aire en ciudades mexicanas 1996**, 1ª ed., México, INE, 1997.

Suspendidas Totales, todas las demás columnas pertenecen a Contaminantes Criterio. [4]

Vemos que además de definir rangos sencillos de comprender, 0-500, se definen las concentraciones máximas de cada contaminante criterio, por lo que puede existir una calidad de aire satisfactoria con respecto a un contaminante, y una muy mala para otro. Como ejemplo, generalmente se tienen concentraciones de Ozono ( $O^3$ ) altas, entre el rango no satisfactorio y malo mientras que el monóxido de carbono ( $CO$ ) está en concentraciones satisfactorias. Como se puede observar el índice IMECA es una manera sencilla de explicar la presencia de contaminantes para que la población tenga información para realizar sus actividades cotidianas.

Todo esto se mide gracias a estaciones meteorológicas y de calidad de aire alrededor de la ciudad, las cuales generalmente están en las azoteas de edificios, o a una mínima distancia de 10m sobre el nivel del suelo. Sin embargo, es muy útil para la población ya que es un sencillo escalamiento para las personas que pueden sufrir por los niveles altos de contaminación, como se muestra en la *Tabla 2*.

<b>IMECA</b>	<b>Efectos sobre la salud</b>	<b>Medidas preventivas</b>
0 a 100	No se presentan efectos negativos en la salud.	No es necesaria ninguna medida preventiva.
101 a 250	· Irritación de la conjuntiva o dolor de cabeza. · Se reactivan los síntomas de los enfermos del corazón o de los pulmones. · Niños, ancianos y fumadores presentan trastornos del aparato respiratorio y cardiovascular.	· Se debe evitar caminar en la calle por tiempos largos. · No es recomendable realizar ejercicio físico al aire libre.
251 a 350	· Lactantes, ancianos y fumadores pueden presentar, además de las molestias anteriores, alteraciones inflamatorias en el sistema respiratorio. · El resto de la población puede presentar trastornos funcionales en el aparato respiratorio y cardiovascular. Se debe evitar caminar en la calle por tiempos largos.	· No realizar ejercicio al aire libre. · No fumar. · Evitar cambios bruscos de temperatura. · Disminuir el contacto con enfermos de las vías respiratorias.
Más de 350	· Los enfermos crónicos de los pulmones o del corazón reactivan sus padecimientos de base. · La población en general pueden presentar alteraciones inflamatorias en su aparato respiratorio.	· Ingestión de jugos de frutas. · Atención médica oportuna si se detecta alguna alteración. · Mantenerse atento a las recomendaciones que emita el Sistema de Salud.

**Fuente:** Instituto Nacional de Ecología, Semarnap / Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental / Agencia de Cooperación Internacional del Japón, **Segundo Informe Sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1997**, 1ª ed., México, INE- Cenica- JICA, 1998.

*Tabla 2.* Relación entre el IMECA, los efectos nocivos a la salud que pueden agravar los contaminantes y recomendaciones para mitigar su nocividad. [4]

Las afecciones a la salud son generales, y cada contaminante criterio puede llegar a causar específicamente diferentes problemas a la salud de los individuos. El IMECA es un índice para comunicar riesgo, mas no para medir la exposición. La exposición se puede definir como el contacto directo con algún agente externo, el cual probablemente generará un efecto adverso a la salud de los individuos.

En este trabajo se optará por utilizar medidas como ppm o  $\frac{\mu g}{m^3}$ . A continuación nos enfocaremos en describir los contaminantes criterio, y sus efectos nocivos. Nos enfocaremos en los siguientes contaminantes criterio: material particulado ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), componentes orgánicos volátiles (COV, precursores del ozono,  $O_3$ ).

### 1.3 ¿Cuáles son los contaminantes criterio?

La Secretaría del Medio Ambiente, o SEDEMA, y el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México son los encargados de monitorear y publicar las lecturas de los contaminantes en el ambiente. Un contaminante es descrito como una molécula que causa una reacción negativa en algún organismo. Estos se pueden medir en Partículas Por Millón (PPM), Partículas Por Billón (PPB) o inclusive en concentraciones como microgramos por metro cúbico ( $\frac{\mu g}{m^3}$ ). Existe una conversión entre estos dos tipos de medición. El Centro para el Estudio de Sustancias Peligrosas en la Universidad Estatal de Kansas publicó un resumen con conversiones sencillas para el público en general, por lo que podemos ver que, acorde con el sistema de medición Estadounidense,  $1 \text{ PPB}' = 24.45 \frac{\mu g}{m^3} \times \frac{\text{Concentración}}{\text{masa molecular}}$ . el Sistema Estadounidense de medición utiliza el término Billón como  $1 \times 10^9$  a diferencia del sistema internacional en el que es  $1 \times 10^{12}$ , por lo que será de mayor utilidad convertir esta ecuación de conversión a partes por millón para evitar confusiones en este trabajo,  $1 \text{ ppm} = 24,450 \frac{\mu g}{m^3} \times \frac{\text{Concentración}}{\text{masa molecular}}$ . Al ver que cada conversión depende de cada contaminante criterio en específico, vemos que es más sencillo generar una Tabla con cada valor de conversión, para mostrar las relaciones de estos sistemas de medición que se van a usar. [5]

Posteriormente nos enfocaremos en las normas que rigen a los contaminantes criterio previamente establecidos, las concentraciones en el año 2016 de estos y sus efectos nocivos para la salud.

Contaminante	ppm	$\frac{\mu g}{m^3}$
$PM_{10}$ y $PM_{2.5}$	No Aplica	la conversión
CO	1 ppm	$1145 \frac{\mu g}{m^3}$
SO <sub>2</sub>	1 ppm	$2620 \frac{\mu g}{m^3}$
NO <sub>2</sub>	1 ppm	$1880 \frac{\mu g}{m^3}$
O <sub>3</sub>	1 ppm	$1960 \frac{\mu g}{m^3}$

Tabla 3. Comparación entre Contaminantes Criterio y su conversión entre la medición Partes Por Millón y  $\frac{\mu g}{m^3}$  a temperatura (298 K) y presión estándar (1 atmósfera) [6,7,8,9,10]

Como se muestra en la *Tabla 3*, la conversión de cada contaminante depende de su masa molecular, por lo que las partículas suspendidas al ser una mezcla variada de compuestos, no pueden tener una sola masa molecular, y sacar un promedio sería diferente para cada momento, por lo que se desistirá de sacar una conversión para estos contaminantes criterio. Cabe destacar que si se tiene un promedio de la capa límite atmosférica de 2746 metros sobre el nivel suelo y se toma el área aproximada de la Ciudad de México,  $1,495 \text{ km}^2$ , se tendría un volumen de  $4,105.27 \text{ km}^3$  de aire en el cual se dispersan todos los contaminantes. Leyendo el Informe de calidad del aire del 2016 de la CDMX podemos observar que el único contaminante criterio que estuvo por debajo de los límites de la Organización Mundial de la Salud fue el CO, por lo que vemos que los demás sobrepasan los límites y se debería trabajar para mitigarlos. [1]

### 1.3.1 Partículas Suspendidas o Material Particulado (MP).

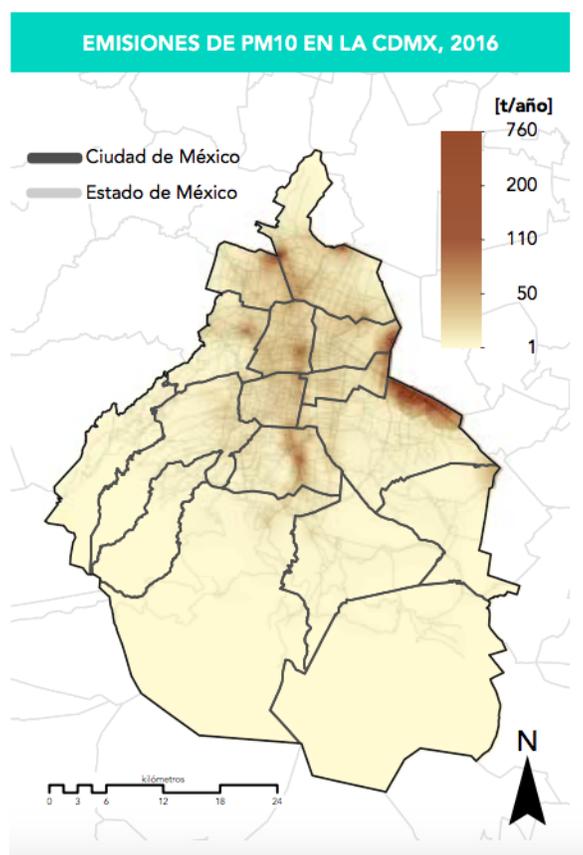
Surgen de diversas fuentes, como de la combustión, la erosión del suelo, e inclusive de fuentes naturales. Se dividen en  $MP_{2.5}$  y  $MP_{10}$ , y hacen referencia al diámetro aerodinámico de las partículas, ya sea equivalente a 2.5 micrómetros ( $MP_{2.5}$ ) o de 10 micrómetros ( $MP_{10}$ ). En 2016 hubo un promedio de concentraciones de  $22 \frac{\mu g}{m^3}$  y  $38 \frac{\mu g}{m^3}$  respectivamente en la CDMX. Cabe resaltar que las  $MP_{2.5}$  son las más nocivas para la salud y éstas como los  $MP_{10}$  afectan al sistema cardiovascular y respiratorio fomentando el desarrollo de enfermedades o condiciones en estos sistemas. Principalmente afectan a los adultos mayores y niños. La norma que rige al  $MP$  es la NOM-025-SSA1-2014 y al compararla con los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud, en la *Tabla 4*, se observa que los límites de la NOM son aproximadamente hasta un 50% superiores. [1,6,12,13]

NOM-025-SSA1-2014			G.C.A. OMS		
MP	Exposición media 24h	Exposición Media Anual	MP	Exposición media 24h	Exposición Media Anual
2.5	$45 \frac{\mu g}{m^3}$	$12 \frac{\mu g}{m^3}$	2.5	$25 \frac{\mu g}{m^3}$	$10 \frac{\mu g}{m^3}$
10	$75 \frac{\mu g}{m^3}$	$40 \frac{\mu g}{m^3}$	10	$50 \frac{\mu g}{m^3}$	$20 \frac{\mu g}{m^3}$

*Tabla 4.* Comparación entre las Normas Mexicanas de Salud y las Guías de Calidad del Aire publicadas por la OMS. [12, 13]

La Norma Mexicana es más laxa que las Guías de Calidad del Aire de la OMS por lo que existe un margen en el que se ve afectada la salud de los habitantes del Valle aún cuando estén entre los rangos “saludables” de exposición.

Vemos así que esto sólo fomenta la predisposición de los ciudadanos a tener problemas de salud, y los más afectados generalmente son los adultos mayores y los niños, especialmente en la zona Noreste de la ciudad, *Figura 3*.



*Figura 3.* Mapa comparativo de la geografía de la CDMX y las concentraciones de PM10 generadas al año [1]

Podemos ver en la *Figura 3* que las alcaldías más densamente pobladas, las de la zona centro, norte y noreste de la CDMX, son en las que existió una mayor cantidad de toneladas concentradas de  $MP_{10}$  en el 2016. Esto se debe a que existe mucho tránsito, ya que son zonas en las que hay industrias, comercios y consecuentemente escuelas y hogares.

### 1.3.2 Monóxido de Carbono, $CO$ .

El Monóxido de Carbono es una molécula que se genera cuando existe una mala combustión de compuestos orgánicos, si se lograra una combustión completa se tendría solamente  $CO_2$  y  $H_2O$ . En el año 2016, se registró un promedio de 0.67 ppm de este contaminante y si lo comparamos con la NOM-021-SSA1-1993 que dicta que no debe de haber más de 11 ppm en un periodo de 8 horas, podemos ver que este contaminante criterio no es un riesgo para la salud pública como los demás. El CO es nocivo para la salud ya que la hemoglobina de la sangre es más afín al CO que al oxígeno por lo que, puede causar efectos tóxicos, reduciendo el suministro de oxígeno en la sangre. [1]

### 1.3.3 Dióxido de Azufre, $SO_2$ .

Esta molécula llega al aire cuando combustibles fósiles contienen azufre. Además de ser el responsable de la lluvia ácida, esta molécula registró un promedio de concentración en el año de 2016 de 0.0046 ppm. Este gas está asociado con problemas relacionados a la disminución de las funciones pulmonares y también al incremento en la resistencia en las vías aéreas. De acuerdo a la OMS no se deben de exceder concentraciones de  $20 \frac{\mu g}{m^3}$  en 24 horas y el máximo que un ser humano podría soportar es concentraciones de  $500 \frac{\mu g}{m^3}$  en un periodo de 10 minutos. Mientras que la NOM-022-SSA1-2010 estipula que 0.110 ppm es el máximo que puede haber en un promedio de 24 horas, en 8 horas es de 0.200 ppm y debe de haber un promedio máximo de 0.025 ppm al año.

Recordamos que  $1 \text{ ppm de } SO_2 = 2620 \frac{\mu g}{m^3}$ , por lo que, aunque los rangos de la NOM ( $288.2 \frac{\mu g}{m^3}$  en 24h) sean mucho mayores que lo de las Guías de la Calidad del Aire de la OMS ( $20 \frac{\mu g}{m^3}$  en 24h), el promedio anual en la ciudad en 2016 fue de concentraciones muy bajas. [1]

### 1.3.4 Los Óxidos de Nitrógeno, $NO_x$ .

Generalmente  $NO$  y  $NO_2$ , agrupados en  $NO_x$ , son generados por los procesos de combustión interna de los vehículos y también son precursores de la lluvia ácida y la formación de Ozono en la atmósfera. En el año 2016 se registraron promedios de concentraciones horarias de  $NO$  0.019 ppm,  $NO_2$  0.036 ppm. Los efectos dañinos para la salud, principalmente de el  $NO_2$ , son la disminución de la función pulmonar, asma e inflamación pulmonar.

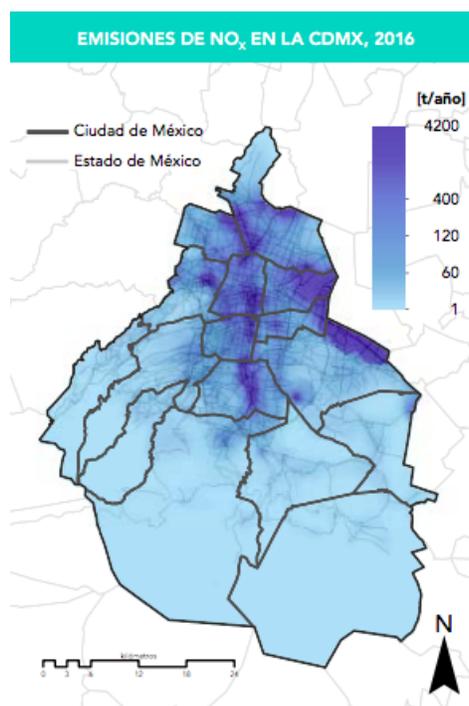
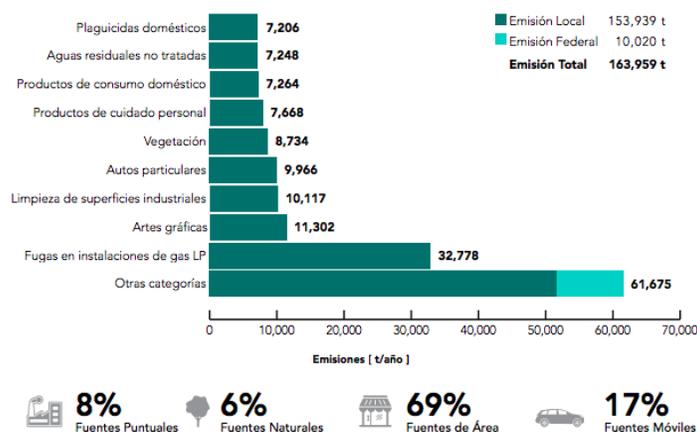


Figura 4. Mapa comparativo de la geografía de la CDMX y las concentraciones de  $NO_x$  generadas al año [1]

Si observamos la *Figura 4* podemos ver que se presenta la misma situación con las altas concentraciones de  $NO_x$  que con las altas concentraciones de  $PM_{10}$  por lo que vemos que el tráfico juega un papel muy importante para la creación de estos contaminantes. La OMS declara que no debe haber más de  $40 \frac{\mu g}{m^3}$  de  $NO_2$  en la media anual, y  $200 \frac{\mu g}{m^3}$  como límite en la media de una hora. En cuanto a la NOM-023-SSA1-1994, el promedio hora no debe rebasar las 0.210 ppm o  $394.8 \frac{\mu g}{m^3}$ , por lo que vemos que la NOM va a la par con las Guías de Calidad de Aire.

### 1.3.5 COV, precursor de Ozono, $O_3$ .

Los Componentes Orgánicos Volátiles generan el contaminante secundario Ozono con la presencia de irradiación solar. Los COV son generalmente liberados al ambiente por fugas de gas LP y por el uso de solventes. Como se puede observar en la *Figura 5* del 2016 de emisiones de COV, existen muchos contribuyentes a la formación del  $O_3$ , siendo los automóviles uno de los emisores de precursores principales.



*Figura 5.* Principales Emisores de COV en la Ciudad de México en el año 2016 [1]

Se observa que la generación de Ozono es un problema grave en la ciudad ya que depende de muchos factores. El Ozono es dañino para la salud ya que reacciona con los tejidos respiratorios ocasionando problemas respiratorios como disminución en la función pulmonar y mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias. A continuación se muestra la comparación entre la NOM-020-SSA1-2014, la OMS y la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EUA (EPA) usando las lecturas recopiladas por la SEDEMA en el año 2016 presentadas en el informe de calidad de aire 2016 de la CDMX por parte de esta secretaría. [1,11,12]

	NOM		OMS	US EPA
	No exceder el máximo de 1 h	Máximo 8 h	Máximo 8 h	4° máximo anual del promedio de 8 h, evaluado en 3 años
<b>Límite permisible</b>	<b>95 ppb</b>	<b>70 ppb</b>	<b>100 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> *</b>	<b>75 ppb</b>
<b>ZMCM</b>	856 h	152 ppb	234 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	115 ppb
<b>Ciudad de México</b>	800 h	152 ppb	234 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	115 ppb
<b>Área conurbada</b>	501 h	134 ppb	206 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	107 ppb

Tabla 5. Comparación entre las lecturas de Ozono en el año 2016 de la CDMX, y los niveles recomendados por parte de las 3 entidades mencionadas anteriormente. [11]

Vemos que, a lo largo del año 2016 (o un periodo de 8760 horas), hubo 800 horas, o casi el 10% de todo el año en la CDMX, en que se registraron valores que eran más del doble del límite establecido por la NOM. Generalmente, estos incrementos excesivos en el ambiente de  $O_3$ , causan las contingencias ambientales, específicamente a partir de mediodía de los días fríos. La dispersión de este contaminante depende de muchos factores, por lo que limitarnos a controlar el tráfico no sería suficiente para lograr reducir sus concentraciones.

## 1.4 ¿Cómo se miden los contaminantes criterio?

En la la CDMX existen 28 dentro de la ciudad y 14 en el Estado de México, incluyendo una en CU, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). Cada estación puede llegar a medir diferentes parámetros atmosféricos y de calidad del aire, en todas tienen equipos para evaluar el cumplimiento de las NOM y generar información para evaluar y seguir las estrategias de gestión de la calidad del aire en la zona metropolitana de la CDMX.

Contaminante	Principio de operación	Descripción del método
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Fluorescencia UV	Método equivalente: medición de la fluorescencia emitida por las moléculas de SO <sub>2</sub> cuando son excitadas por una fuente de radiación ultravioleta.
Monóxido de carbono (CO)	Absorción en el infrarrojo	Método de referencia: medición de la absorción de luz infrarroja por parte del monóxido de carbono en una celda de correlación.
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Quimioluminiscencia	Método de referencia: medición de la luz emitida durante la reacción entre el NO y el O <sub>3</sub> . La separación de las especies nitrogenadas se realiza a través de la medición diferencial de NO y NO <sub>2</sub> (previa reducción catalítica). El valor de NO <sub>x</sub> corresponde a la suma de NO+NO <sub>2</sub> .
Ozono (O <sub>3</sub> )	Fotometría UV	Método equivalente: absorción de luz ultravioleta en una longitud de onda de 254 nm, la disminución en la intensidad es proporcional a la concentración de ozono de acuerdo a la ley de Beer-Lambert.
Partículas suspendidas PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	Gravimetría	Método equivalente: determinación de la masa de partículas presente en un flujo de aire, las partículas son separadas de la corriente y depositadas sobre un filtro colocado en un elemento oscilante, la variación en la frecuencia de oscilación es proporcional a la masa. El tamaño de partícula está determinado por la entrada selectiva y el flujo de muestra.
Partículas suspendidas PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>	Atenuación de radiación beta	Método equivalente: atenuación en la intensidad de la radiación beta por las partículas depositadas sobre un filtro continuo.

Tabla 6. Contaminantes, principio de operación y descripción de este último basado en la EPA de EU [13, 14]

Cada estación cuenta con un sensor específico para cada uno de estos contaminantes. El principio de operación de estos sensores depende del tipo de contaminante ya que se basan en características físicas o químicas de los compuestos.

En el marco teórico se profundizará en el principio de operación de sensores, y en casos específicos, de sensores de gas. Por ahora se menciona cómo operan los sistemas con los que se cuenta en las estaciones de medición de la CDMX. En la *Tabla 6*, vemos que existen varios métodos para sensar contaminantes. Para el caso del *MP*, se puede medir por medio de gravimetría o atenuación de radiación beta. La EPA publicó una nueva versión de un documento a finales del año pasado con las referencias asignadas y métodos equivalentes para sensar contaminantes, en el que publican los sensores que han sido probados y verificados para su uso como referencias de medición de contaminantes. El gobierno de la CDMX siempre se ha basado en este documento para obtener sus sensores por lo que podemos ver que son de buena calidad y tienen una gran investigación anterior de por medio. Sin embargo, podemos observar que las estaciones de monitoreo atmosférico llegan a estar en zonas alejadas de la fuente de los contaminantes, cuando estos ya se han mezclado en el medio ambiente. Esto es mencionado ya que el aire que miden se encuentra a varios pisos sobre el nivel del suelo, además de que se utilizan instrumentos los cuales llegan a ser poco accesibles por su costo y especialidad.

Como se puede observar, la contaminación tiene niveles por encima de los recomendados por la Organización Mundial de la Salud en al menos 4 de los 5 principales contaminantes criterio. Además las estaciones de lectura de la Ciudad miden estos contaminantes a una diferente altura a la cual están expuestos los transeúntes, por lo que deben de variar las concentraciones y la forma en que se dispersan los contaminantes.

## **Capítulo 2**

### **2.1 Objetivo**

Desarrollar un sistema de instrumentación para obtener la morfología en tiempo real del flujo de contaminantes en una acera cerca del arroyo vehicular.

### **2.2 Alcances**

Este sistema instrumentado permitirá, por primera vez, observar el flujo de contaminantes producido por el tráfico vehicular en una acera en tiempo real. El proyecto del cual emana este trabajo es importante para la sociedad del Valle de México, no sólo por las repercusiones en la salud sino también en lo relacionado con urbanismo y movilidad ciudadana. En lo específico para el área de la ingeniería, podemos definir varias metas para trazar un plan de trabajo pertinente.

- Investigar los procesos que intervienen en la exposición a la contaminación en un ambiente urbano
  - Esto nos ayudará a mitigar la exposición a la contaminación

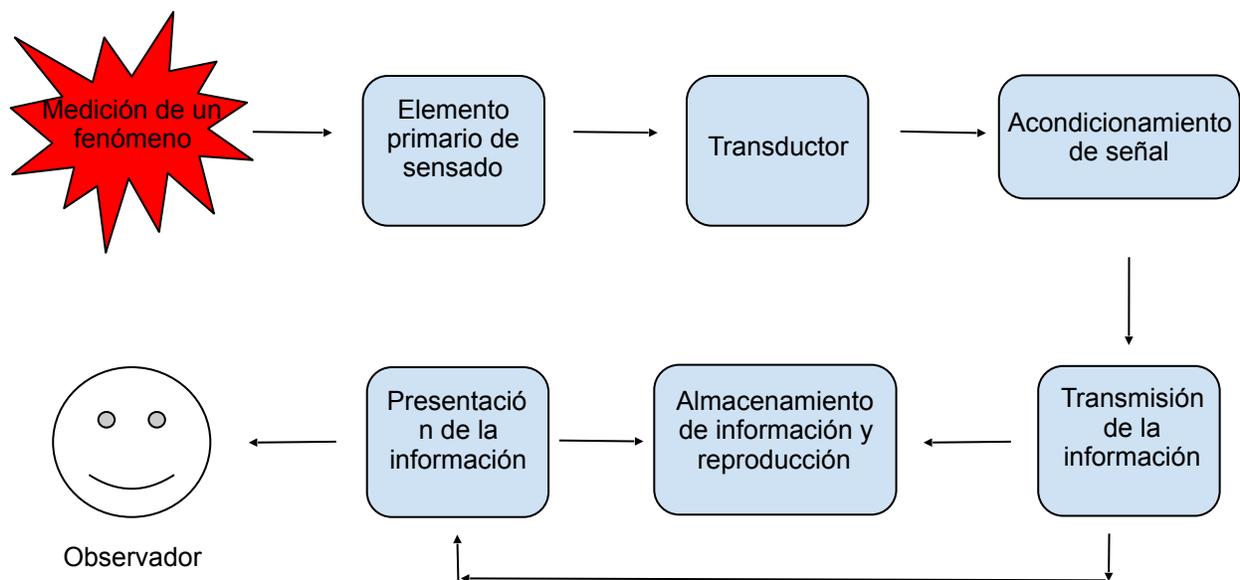
- Investigar la tecnología de medición de contaminantes atmosféricos.
  - Saber el estado del arte y las opciones con las cuales se cuenta lo que nos permite conocer las limitaciones o posibles áreas de aprendizaje en esta área..
  
- Desarrollar un sistema para medir contaminantes.
  - Esto unirá las dos anteriores, concretando las investigaciones e ideas generadas en estas metas.
  
- Evaluar el sistema para medir contaminantes.
  - Una vez que se tenga el sistema para medir contaminantes, se deben de hacer caracterizaciones de este para verificar su utilidad .
  
- Utilización en campo y análisis de los resultados.
  - Ya que se haya verificado que el sistema sirve, se deberá de desplegar en campo haciendo pruebas, para posteriormente analizar la información obtenida.

## Capítulo 3

### Marco Teórico

#### 3.1 Instrumentación y errores

La instrumentación es necesaria en todos los aparatos que requieran tomar información de un medio para posteriormente realizar una actividad. Sin la instrumentación de sistemas, aunada al control y a la experimentación, no se tendrían los aparatos que hoy en día han facilitado la vida diaria. Simplemente analizando el transporte y la velocidad de éste, vemos que no serían viables los coches, trenes y barcos sin tener retroalimentación de la velocidad del vehículo y la cantidad de combustible del cual se dispone. Un sistema de instrumentación se debe de componer de varios elementos, desde el fenómeno a medir hasta al observador, esto se puede apreciar en la *Figura 6*.



*Figura 6.* Elementos funcionales de un sistema de instrumentación [15]

La instrumentación se podría describir como el desarrollo de sistemas de retroalimentación para conocer los alcances y limitaciones de sistemas. Entonces los elementos de sensado y los transductores, son elementales antes de cualquier etapa de procesamiento de información. Los transductores, elementos que convierten un tipo de energía en otra proporcionalmente, y los sensores, elementos que cambian con respecto a una variable, requerirán énfasis después de que se hable de los paradigmas que se tienen a la hora de hacer sistemas de instrumentación. En el desarrollo de tecnología, se deben definir las características que tendrán los instrumentos que componen el sistema. Características muy importantes serían la repetibilidad, exactitud, linealidad y confiabilidad con la cual nuestros sistemas miden.

Dependiendo del nivel de precisión de estas características, veremos un aumento o decremento en el costo de nuestros instrumentos, por lo que vemos que si este último es una limitante, es recomendable establecer un umbral de necesidades que el dispositivo deberá de cumplir. Al ver lo relevantes que son las mediciones, cabe mencionar que el simple acto de hacer una medición cambia las propiedades de lo que se está midiendo. Un primer ejemplo podría ser el de un dinamómetro el cual agrega una carga extra al peso que se pretende medir. Es por esto que siempre se debe de tener en cuenta que el instrumento que se utilizará para medir podría afectar la misma medición del sistema de instrumentación.

Un claro ejemplo es el principio de incertidumbre de Heisenberg,

$$(\Delta x)(\Delta P_x) \geq \frac{\hbar}{2}$$

que establece que no es posible determinar con precisión absoluta, el cambio de posición ( $\Delta x$ ) de una partícula sin que se pierda información intrínseca de la partícula cómo su momento ( $\Delta P_x$ ). Esto nos demuestra que inclusive al mínimo nivel de materia se tienen discrepancias entre lo que se puede medir y lo que está fuera del alcance de nuestro conocimiento *actual* sobre las propiedades de las bases de nuestra realidad.

Todos los elementos que dan lectura son propensos a tener un margen de error, esto es, un porcentaje mayor o menor a la lectura real. Siempre se debe de hacer una caracterización de los sensores o instrumentos que se vayan a utilizar, esto con el propósito de saber exactamente cómo se comporta cada sensor que se vaya a utilizar. Las caracterizaciones deben de hacerse con múltiples pruebas, dentro del rango de trabajo especificado por la compañía que vende el producto. [15]

Existen dos formas de medir errores: por características estáticas y por efectos dinámicos. Las características estáticas son las causadas por la no linealidad, el desvío, errores de resolución y la repetibilidad. Los efectos dinámicos son causados principalmente por la histéresis, tiempo de asentamiento y variación en respuesta. A continuación se ejemplifican los tipos de errores más comunes.

### **3.1.1 Errores no planeados.**

Este tipo de errores son frecuentes y aleatorios ya que simplemente ocurren sin posibilidad de evitarlos completamente. Para prevenir este tipo de errores se debe de hacer múltiples pruebas y encontrar la media, varianza, y por lo tanto el error estándar.

### **3.1.2 Errores sistemáticos.**

Presentes cuando el valor verdadero de una lectura se separa cierto rango de la lectura original y posteriormente sus errores de lectura no planeados, nos dan alrededor del nuevo valor y no del valor real. Para contrarrestar esto, es preferible comparar las lecturas con un sensor base el cual ya ha sido caracterizado.

### **3.1.3 Errores por lecturas indirectas.**

Estos se presentan cuando no se puede hacer la lectura directa de la variable necesaria, por lo que se utiliza otra variable que sabemos se puede relacionar estadísticamente con la primera. En este caso no sólo se agregan errores no planeados y sistemáticos de una variable sino de dos, complicando aún más el muestreo. De tal manera, siempre se debe tratar de hacer lecturas directas, y si no se puede, se deberá de caracterizar de una manera muy rigurosa el sensor, definiendo límites superiores y menores de error, recordando que el valor registrado no será exacto. [15]

### 3.2 Sensores.

Un sensor es un sistema el cual es afectado por algún fenómeno de la naturaleza, si los sensores son acoplados a un transductor, se puede tener el inicio de un sistema de instrumentación. Un transductor es un sistema que convierte un tipo de energía a otra. Existen los transductores de salida, o actuadores y los transductores de entrada. Estos últimos convierten un tipo de parámetros del ambiente, sea temperatura, presión, fuerza, tipos de gases o inclusive campo magnético, en energía eléctrica, por lo que a veces pueden ser confundidos con sensores. Aunque todos los transductores son sensores, no todos los sensores pueden ser considerados como transductores ya que a veces existen propiedades que no son tan fáciles de cuantificar o inclusive de ligar linealmente con algún parámetro de la naturaleza. Los transductores de entrada se pueden dividir en 3 categorías, Modificadores, Auto-generadores y Moduladores. [15]

En los **Modificadores** se tiene el mismo ingreso de energía que la que sale, por lo tanto, energía eléctrica es modificada en energía eléctrica, química en química y mecánica en mecánica.

Los **Auto-generadores**, se excitan en respuesta al medio ambiente y producen un nivel de energía muy bajo, por lo que necesitan una etapa de filtrado y amplificación.

Los **Moduladores** operan de la misma manera que los Auto-generadores pero además, requieren una alimentación de energía externa para funcionar, dependiendo generalmente de energía eléctrica. Este tipo de sensores actualmente son los más empleados por su facilidad ya que se conectan y pueden empezar a trabajar. [15]

Al ver que los sensores dependen de cómo se les suministra y liberan energía, vemos que es necesario clasificarlos en las diferentes áreas en las que se pueden utilizar. Existen subdivisiones de sensores para necesidades específicas, como podría ser el trabajo que van a realizar, como medir presión o distancia. Primero se dará un panorama general de los sensores más empleados en la instrumentación y algunas de las aplicaciones en las que se usan. La clasificación de los sensores es un tema muy interesante ya que algunos principios de sensores pueden ser utilizados para cuantificar algún fenómeno, y posteriormente se pueden acomodar de otra manera para medir otra propiedad física, todo esto dependiendo de la necesidad de instrumentación. Los sensores pueden ser parte de un sistema mecatrónico con control avanzado, como el sistema de velocidad de un coche, o sencillos como una fotorresistencia acoplada en un foco que lo prende o apaga dependiendo de la cantidad de luz en el medio ambiente. Vale la pena mencionar los principios de operación de algunos sensores comúnmente empleados, por lo que la *Tabla 7*, ayuda a familiarizarnos con la amplia gama de sistemas que pueden depender de un sensor. [16]

### **3.2.1 Clasificación de Sensores.**

Principio de Operación	Características	Posibles aplicación
Lineal o Rotacional	Dan una salida eléctrica dependiendo del desplazamiento que reciban. Pueden ser de contacto o no invasivos. Dependen del rango de medición.	Medidores de velocidades directos, tacómetro; indirecto, interferómetro. Medidores de Campo magnético a baja escala, sensor Hall.
Aceleración	Útil en sistemas propensos a golpes y vibraciones. Directamente proporcional a la aceleración del sistema. Se dividen en dos modalidades, Masa Sísmica y Piezoeléctricos.	Masa Sísmica, depende de la masa y la estructura que lo sostiene, para aplicaciones de mediana a baja frecuencia. Piezoeléctrico, más pequeño y se usa en aplicaciones de alta frecuencia.
Fuerza, Par de Torsión y Presión	Pueden medir fuerza o Par de torsión en uno o múltiples ejes. Pueden emplear dos tipos de fundamentos, dinamómetros de galgas extensométricas o piezoeléctricos.	Dinamómetros, partes de ellos son flexionadas y dependen de su frecuencia natural. Piezoeléctricos funcionan con alta rigidez y alta resolución, pueden funcionar a diferentes frecuencias.
Flujo	Pueden medir flujo turbulento o laminar además de que pueden medir gases o líquidos, e inclusive la mezcla de estos. Principales diferencias, de contacto o no invasivos.	Contacto, pueden ser empleados con flujos de agua, como el tubo Venturi o Pitot e inclusive un rotámetro. Ultrasónicos, para flujos de gases o líquidos corrosivos, se basan en el efecto doppler generado entre un Transmisor y un Receptor.
Temperatura	Termopares, versátiles y baratos, juntan dos materiales diferentes y la diferencia de estos da la lectura. Termistores, semiconductores que cambian de resistencia dependiendo de la temperatura.	Detectores de Temperatura de Resistencia, estables con un amplio rango de lectura. Infrarrojos, utilizan el calor de radiación para medir la temperatura de los objetos, no son invasivos y permiten generar mapas.
Proximidad	Dependen de un objeto de referencia para localizar otro. Pueden utilizar la inductancia, capacitancia, el efecto fotoeléctrico o el efecto Hall.	Inductancia y Capacitancia, varían cuando hay presencia de un material férreo. Fotoeléctrico, dependen de un haz de luz infrarroja, cuando un objeto se atraviesa, este cambia y hay una diferencia de potencial eléctrico.

Luz	Pueden basarse en el cambio de la intensidad de la luz o de la visión de campo completo para el control de un proceso. Pueden ser fotoresistencias, fototransistores o fotodiodos.	Al ser baratos, simples y confiables, son muy útiles en para determinar la intensidad de luz, especialmente las fotorresistencias, que tendrán menor resistencia conforme haya más luz.
Materiales Inteligentes	La fibra óptica, piezoelectrónicos y materiales magnetostrictivos son nuevas opciones para generar sensores. Pueden ir embebidos en sistemas ya conocidos, dando lecturas exactas al momento.	La fibra óptica puede ser utilizada para medir tensión, nivel de líquidos, fuerza y temperatura a alta resolución, además de que puede ser utilizada para medir daño, vibraciones y monitorear el curado al estar in situ.
Micro y Nanosensores	Los MEMS son versiones micrométricas de sensores cotidianos los cuales tienen mejor desempeño y un costo reducido.	Un fibroscopio de 0.2 mm de diámetro puede inspeccionar fallas en tuberías. Un sensor microtáctil puede detectar presiones entre un catéter y la pared interna de los vasos sanguíneos con un rango de sensibilidad de 1mN.

Tabla 7. Comparación entre las principales divisiones de sensores con respecto a su forma de operar y su propósito. [16]

Al observar, apreciamos que todos los sensores resuelven problemas de instrumentación para situaciones con las que se debe lidiar diariamente, desde presión y temperatura, hasta temas de alta precisión como flujo magnético y la fibra óptica. Es muy útil saber de la existencia de todos ellos ya que nos permiten afrontar problemas de instrumentación de diferentes maneras, dándonos opciones para encontrar la mejor solución a la instrumentación que se va a desarrollar. Aunque la amplia gama de sensores y sus características son temas muy interesantes por su propia cuenta, sólo nos enfocaremos en los sensores de flujo, específicamente en los sensores que nos ayuden a medir gases y sus concentraciones, ya que estos ayudarán a realizar nuestro objetivo. A continuación se profundizará en sensores de gas y sus principios de operación.

### **3.3 Sensores de Gas**

Al enfocarnos en la necesidad de sensor gases, vemos que hay una gran variedad de métodos por los cuales se pueden medir presencia y hasta concentración de diferentes partículas gaseosas. Existen 9 diferentes métodos para hacer sensado de materiales aéreos: semiconductores de óxido, capas delgadas de semiconductores de óxido metálicos, semiconductores basados en capas gruesas de óxido de estaño, sensores de gas catalíticos, semiconductores orgánicos, sensores de gas por efecto de campo, sensores de superficie de onda acústica, sensores de gas ópticos y sensores electroquímicos. Nos enfocaremos principalmente en dos de ellos: sensores electroquímicos y ópticos, ya que son los principios de operación de los sensores que eventualmente se eligieron para realizar nuestros alcances y el objetivo de este trabajo. [17]

#### **3.3.1 Sensores Electroquímicos.**

Estos sensores se basan en generar una corriente por medio de una interfaz de iones por medio de conductores. Esto quiere decir que entre mayor sea la concentración o presión parcial de los gases, habrá mayor o menor corriente. Esta corriente puede generar una fuerza electromotriz o simplemente el flujo de corriente. Los sensores que generan la fuerza electromotriz se llaman potenciométricos y los que generan corriente son amperométricos. Una ventaja que tienen estos sensores es el hecho de que pueden miniaturizarse y aún presentar las mismas características reactivas, además de que cuentan con posibilidades de tener a los sensores en los tres estados base de la materia, gas, líquido o sólido, dependiendo de la aplicación en la cual vaya a ser utilizado el sensor.

Los **sensores potenciométricos** generan una fuerza electromotriz, generalmente un voltaje de circuito abierto, que en sí es la suma de los dos potenciales entre la interfaz electrónica y la de un conductor iónico. El principio de funcionamiento es el hecho de que el potencial electroquímico de los electrones es el mismo a nivel electrónico y en la fase conductora iónica cuando se tiene equilibrio electroquímico. Al tener una interfaz, vemos que dependiendo del conductor iónico, habrá diferentes tipos de estos sensores, ya sea teniendo valores de referencia y comparándolos con el valor actual leído, o teniendo la interfaz con dos conductores y midiendo la diferencia entre ellos por la presencia del gas a sensor, inclusive a veces se usan sólidos electrolíticos.

Los **sensores amperométricos** generan una corriente en un sistema directamente proporcional a la concentración de gases que se están midiendo. Al generar corriente, vemos que pueden ser de carácter Voltamétrico (diferencia de potencial entre tres electrodos, teniendo uno de referencia), Galvanométricos (los electrodos son puestos en corto circuito y dependen de la cantidad de oxígeno) o Coulométricos (se basan en la ley de Faraday donde se tiene un valor absoluto de las cantidades de especies descargadas con respecto a la corriente transferida). [17]

### 3.3.2 Sensores Ópticos.

Este tipo de sensores se basan en alguno de los siguientes principios ópticos: la absorción, fluorescencia, dispersión de luz, cambios en el índice de refracción o en la longitud del camino óptico. También el uso de fibra óptica o analizadores no dispersivos infrarrojos son útiles para analizar gases de forma remota. Estos sensores tienen como ventajas: alta resistencia, inmunidad por ruido magnético o eléctrico, flexibles, bajo nivel de inflamabilidad y que no requieren contacto con corriente eléctrica ya que no utilizan principios electrónicos. Los sensores más comunes de esta gama utilizan un material sensible a algún compuesto químico específico, emitiendo alguna fluorescencia o cambio de color, generando así una respuesta óptica de la presencia o no del compuesto específico. Los sensores de detección por interferencia de luz, se basan en el principio que cada partícula tendrá un índice de refracción (situación en la cual un haz de luz cambia de velocidad y dirección) diferente. La Ley de Mie se utiliza en varios sensores ya que la que una frecuencia específica generará dispersión de sólo ciertas moléculas. Con esto se llega a obtener la concentración de los compuestos o partículas que se encuentren en el medio ambiente. Estos sensores llegan a ser bastante sensibles ya que el índice de refracción de cada especie de elemento es independiente de las fases que los gases puedan tener. [17]

Al observar la amplia gama de opciones que se tienen sólo para los sensores de gas, nos vimos en la necesidad de hacer una búsqueda para encontrar los sensores que nos ayudarían a realizar nuestro objetivo y los acercamientos que se han planteado dentro de este trabajo considerando costos, tiempo y necesidades.

## **Capítulo 4**

### **Desarrollo**

Cómo ya se mencionó, este proyecto se enfoca en realizar un arreglo de sensores que midan contaminantes en la vía pública. Se deben definir las dimensiones del banco de pruebas y sobre todo aproximar un costo estimado a todo el proyecto, se deben de definir los requerimientos y especificaciones, esto nos servirá para tener una idea general de lo que se busca llegar a crear y poder buscar las propuestas que mejor encajen con los lineamientos del proyecto.

#### **4.1.1 Requerimientos**

Los requerimientos son útiles para los alcances intangibles del proyecto, esto quiere decir, cualquier característica que nos pueda ayudar a mejorar el sistema sin que tenga una variable medible. Los requerimientos fueron que nuestro sistema no generara aversión a la vista de los transeúntes, que fuera fácil de poner y quitar por cualquier eventualidad, que fuera de bajo costo y que no fuera muy complicado de utilizar para que todos los involucrados en el proyectos pudieran utilizarlo sin necesidad de tener un conocimiento profundo de todo lo que sucedía en el sistema.

### 4.1.2 Especificaciones

Las especificaciones fueron más sencillas de definir ya que éstas sí podían ser cuantificables y se podían establecer límites que nos ayudaron a definir si las características de un elemento del sistema podría funcionar o no. Estas fueron:

- Medir los CC, monóxido de carbono *CO* y Material Particulado *PM2.5*.
- tener sensores que enviarían información máximo cada 5 segundos.
- que la información pudiera ser accedida lo más pronto posible.
- Se definió un máximo de un plano de  $4m^2$  como área para que el sistema se desplegara.
- Se limitó el tiempo de una hora como un mínimo de tiempo de funcionamiento.

Definiendo las especificaciones y requerimientos, vimos que el proyecto se podía dividir en dos secciones principales, las partes mecánicas y las partes electrónicas. Primero nos enfocamos en desarrollar el sistema de instrumentación, desde la selección de los sensores y sus características. Posteriormente pasamos por el sistema de adquisición de datos y finalmente la búsqueda para encontrar la mejor manera de desplegar la información recopilada. Una vez desarrollado el sistema de instrumentación nos enfocamos en las estructuras mecánicas que se desarrollaron para hacer funcionar este prototipo, la estructura principal y las fundas de los sensores seleccionados.

## **4.2 Sistema de Instrumentación**

### **4.2.1 Selección de Sensores.**

En la primera investigación se encontraron varias propuestas de sensores que podrían resolver los objetivos del trabajo, además de plataformas ya especializadas para realizar la medición de contaminantes. Estas propuestas fueron: Google Aclima, Sensores de la marca Specs, sensores de la marca CleanSpace y unos sensores de la marca Plantower.

#### **4.2.1.1 Google Aclima.**

Esta propuesta era muy llamativa ya que involucraba a una división de la compañía tecnológica especializada en hacer mediciones de contaminantes por medio de una plataforma que incorporaba mediciones en edificios, automóviles y transeúntes. Esta plataforma inteligente combinaba sensores de estado del arte, computación de nube y aprendizaje automático para entender cómo se mueven los contaminantes a lo largo de ciudades. Además, esta plataforma era un proyecto en conjunto con varias universidades y dependencias del gobierno de Estados Unidos. Sin embargo, nunca se pudo establecer una comunicación con los responsables de la plataforma por lo que se decidió buscar otras opciones. [18]

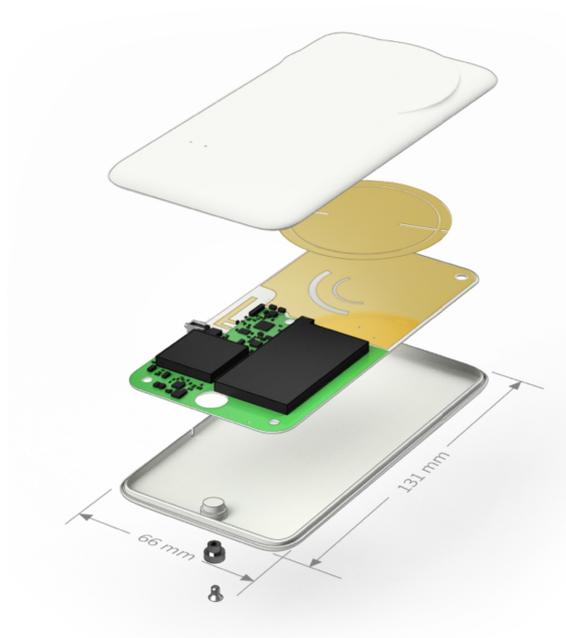
#### **4.2.1.2 Sensores de la marca Specs.**

Estos sensores se vendían en un paquete con la capacidad de medir varios contaminantes criterio, como sería el caso de  $CO$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ , además de irritantes respiratorios. Esto daba la opción de generar una investigación que no dependiera de un sólo contaminante. Se desistió de estos sensores ya que implicaban un mayor trabajo y costo por el hecho de tener que programarlos y caracterizarlos individualmente. [19]

#### **4.2.1.3 Sensores CleanSpace.**

Estos sensores fueron obtenidos gracias a un convenio entre la compañía Drayson Technologies y la UNAM. La compañía prestó dos productos, los CleanSpace Tags que sirven para lecturas personales de  $CO$  que son enviadas directamente al celular del usuario por medio de una aplicación; y los Aura, varios sensores conectados a un celular creando una red de lecturas. Esta red enviaba todas las diferentes concentraciones de  $CO$  a una base de datos, la cual después era accedida para descargarlos. Los sensores Aura obtienen lecturas cada 10 segundos a diferencia de los Tags, los cuales obtenían lecturas cada 10 minutos si no se movía el usuario, o cada minuto si se optaba por ello en la aplicación. [20]

Ambos productos se cargan por medio de una antena que capta frecuencias Wifi y 2G; además cuentan con una batería precargada, por lo que no tienen batería infinita. Tienen un rango de lecturas de 0-500 *ppm* de *CO* y además miden la temperatura del ambiente. Como se muestra en la *Figura 7*, estos sensores tienen dimensiones parecidas a las de un celular y son estéticamente agradables, ya que lo único que se ve afuera de su empaque son los 2 orificios de toma de muestras y un tornillo incorporado para fijarse a superficies.[21]



*Figura 7.* Explosivo con dimensiones de los Airtags de CleanSpace [20]

#### 4.2.1.4 Sensores Plantower PMSA003I.

Todas las veces que se mencione el trabajo con estos sensores fue en colaboración con los estudiantes del Centro de Ingeniería Avanzada de la Fac. de Ingeniería (CIA). Los sensores que miden partículas suspendidas en el aire pueden ser divididos en 3 tipos, sensores que miden partículas de  $1 \mu m$ ,  $2.5 \mu m$  y  $10 \mu m$ . Se les denomina  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  respectivamente. Este sensor tiene la posibilidad de leer no solo estos 3 tipos de contaminantes, sino que, además, miden las concentraciones entre estos parámetros y también por encima de los ya establecidos. Pueden obtener lecturas mayores a  $1000 \frac{\mu g}{m^3}$  y funcionan con 5V de corriente directa pero deben de tener una corriente suficiente para poder alimentar el ventilador y la conexión para enviar señales con la información procesada a 3.3V de potencia.

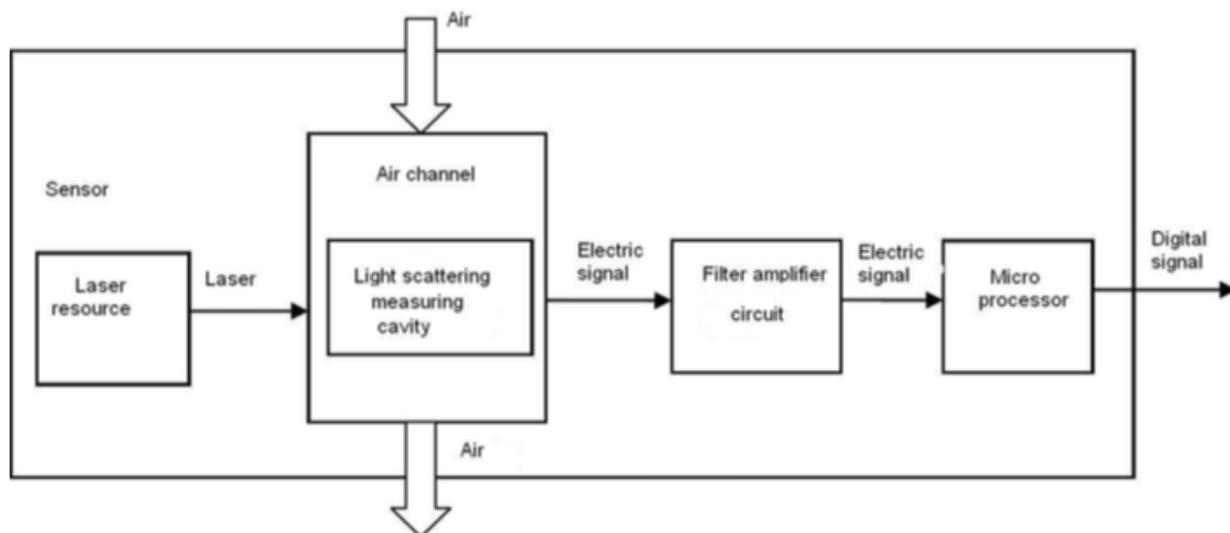


Figura 8. Diagrama de flujo del funcionamiento de los sensores PMSA003I [22]

El diagrama de flujo en la *Figura 8* explica que funcionan por medio de un ventilador el cual genera un flujo de aire y lo hace pasar por una cámara en la cual hay un láser, la luz de este láser es esparcida por las moléculas que entran y basándose en la teoría de Mie, el sensor filtra y posteriormente procesa la señal obtenida, dándonos por medio de comunicación  $I^2C$ , las concentraciones de los materiales particulados. Un valor agregado de estos sensores es que pueden enviarnos lecturas para sólo un  $PM$  en particular o toda la gama de posible de materiales particulados en el momento de lectura, esto es, se pueden obtener todas las lecturas de  $PM_{0.3-1}$ ,  $PM_{1-2.5}$ ,  $PM_{2.5-10}$  y además lecturas mayores a  $PM_{10}$ .

Se definieron los sensores de CleanSpace y Plantower como los ideales ya que podían medir las concentraciones de dos contaminantes criterio,  $CO$  y  $PM$ , además de que cumplían las especificaciones de medir en tiempos de 5 segundos y también tenían un rango de lectura de concentraciones que encajaba en lo establecido por las Normas Mexicanas. Otra ventaja de estos sensores es que tienen un costo accesible por lo que, en general, el arreglo de estos sensores era factible. Además, tenían un sistema de tratamiento de datos muy útil para los fines de nuestro proyecto ya que ambos permiten tener el acceso a los datos de manera casi instantánea. Al ser sensores de contaminantes diferentes, a continuación se explicará cómo se comunicó con estos sensores, su caracterización, la manera en la cual se desplegó la información de ellos y posteriormente nos enfocaremos en los desarrollos mecánicos que se generaron para crear el arreglo de nuestro sistema de instrumentación y poder concluir nuestro objetivo.

### 4.3 Adquisición de Datos.

#### 4.3.1 Aura

Estos sensores primero fueron utilizados en su modalidad Airtag ya que era bastante sencillo conectar los Airtags a los celulares, sólo necesitaban 2 horas para sincronizarse con el celular. Posteriormente todo el tiempo se podía revisar las concentraciones de *CO* abriendo la aplicación. En la *Figura 9* se puede apreciar un diagrama de flujo en el que se muestra el sistema de cómo transmitían información los sensores.



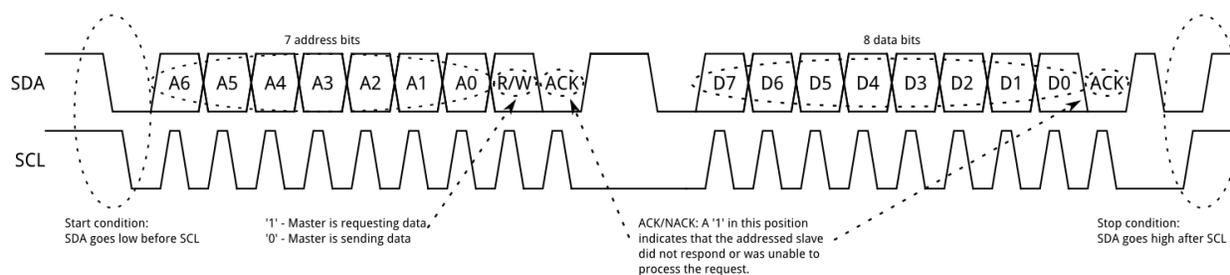
*Figura 9.* Diagrama explicando el funcionamiento de los sensores Cleanspace [20]

Además, la compañía enviaba un reporte con todas las lecturas de los tags en formato de hoja de datos cada semana, por lo que eran fáciles de usar. Aunado al proyecto, también fueron utilizados para medir contaminantes para los usuarios del pumabus, camión en Ciudad Universitaria, y metrobús, camión en la CDMX.

Esto eventualmente logró desarrollar un manual para hacer intervenciones urbanísticas que ayudan a mejorar la calidad del aire para los transeúntes y ciclistas. La modalidad Aura de los sensores será profundizada en la parte de interfaz gráfica ya que fue con la que más se trató a la hora de hacer caracterizaciones.

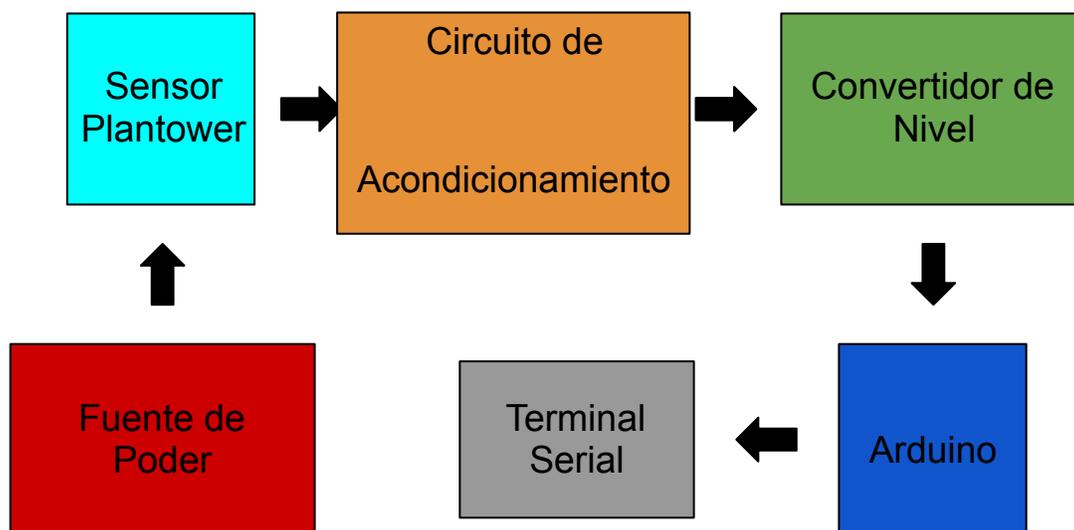
### 4.3.2 PMSA003I

Para poder adquirir información de estos sensores, primero se debía comunicar el sensor con algún tipo de microcontrolador, se optó por los microcontroladores Arduino por su facilidad y conocimiento previo de sus alcances. El sensor se comunica por protocolo  $I^2C$ , lo que significa que envía información por medio de dos entradas al microcontrolador. La primera es una de reloj, la cual emite un pulso continuo y nos ayuda a descifrar la segunda, la cual es la línea de datos. Esta línea de datos depende de cada producto, sin embargo, en la hoja de especificaciones de cada uno viene la manera de descifrar el código. En la siguiente figura, *Figura 10*, obtenida de la hoja de especificaciones de los sensores Plantower se puede apreciar cómo se relacionan estas dos entradas.



*Figura 10.* Lógica de las entrada Reloj y Dato de los sensores Plantower [22]

Primero se tuvo que implementó un circuito externo, a base de resistencias y un capacitor, para adecuar la lectura del sensor al microcontrolador. Se requirió alimentar al sensor de manera externa al microcontrolador cuando observamos que el sensor no enviaba lecturas acorde con la hoja de especificaciones. Esto se debe a que el sensor demanda corrientes mayores a las que el microcontrolador puede suministrar. El ventilador que tiene incorporado el sensor llega a demandar hasta 50 mA de corriente por lo que sería una corriente dañina para los microcontroladores. Aunado a esto, se vió necesario implementar un convertidor de nivel ya que el sensor se comunica a 3.3V de potencia mientras que el microcontrolador trabaja a 5V. La *Figura 11* presenta un diagrama de flujo en el que muestra todos los elementos necesarios para poder obtener la Adquisición de datos de los sensores.



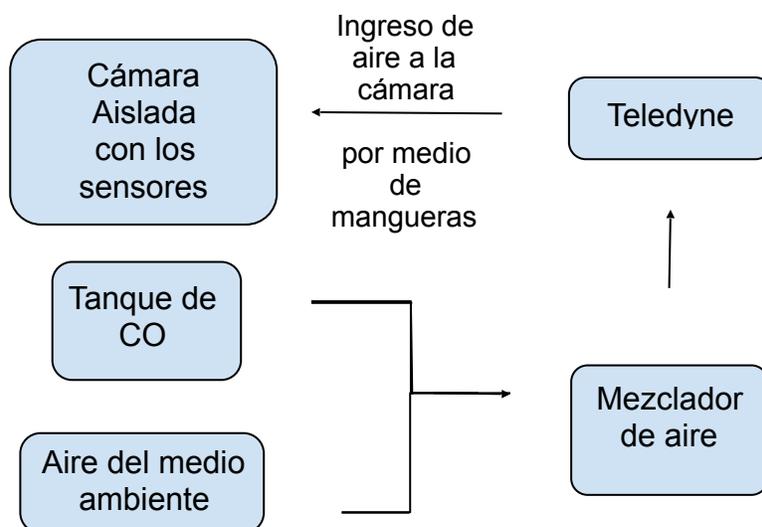
*Figura 11.* Diagrama de flujo de la adquisición de datos de los sensores PMSA003I

Se tuvieron que soldar adaptadores específicos para los sensores ya que tienen una entrada milimétrica muy específica y diferente a las conexiones en sistema estadounidense en las cuales se basa la electrónica en nuestro país. Una vez implementadas todas las adecuaciones anteriores, se procedió a verificar que los datos pedidos por el microcontrolador eran los que estaba enviando el sensor. Esto fue de suma importancia ya que los sensores envían no sólo los datos de  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en una sola cadena de datos sino que también envían las concentraciones entre estos niveles. La manera de adquirir las lecturas fue por medio de un código generado para la tarjeta Arduino. Este código nos desplegaba la información de lectura del sensor en el monitor serial, sin embargo, se verificó con un osciloscopio especializado, con la capacidad de hacer lecturas de protocolo  $I^2C$ , que se estaba procesando la parte de la cadena de datos específica a las concentraciones de  $PM_{2.5}$ . Al corroborar que se accedía a la información de los sensores de manera adecuada, se utilizó un *Monitor de aerosoles personal* DataRAM pDR-1500 para corroborar las lecturas de los Plantower y posteriormente se utilizó este aparato como valor de referencia para caracterizar los sensores. [22]

## 4.4 Caracterización de los Sensores.

### 4.4.1 Aura

Las primeras pruebas de caracterización que se desarrollaron para el proyecto fueron con los sensores de CleanSpace. Estas pruebas fueron propuestas para caracterizar dichos sensores y saber cómo reaccionaban con respecto a la presencia, aumento y decremento del contaminante criterio  $CO$ . Se desarrolló primero una prueba con los sensores Airtag en la cual se iniciaba con aire cero y posteriormente se modificaba la concentración de  $CO$  en una cámara aislada. Se utilizó un medidor de  $CO$  de la marca Teledyne, el cual ya está caracterizado a estándares de la EPA, como referencia real de las lecturas de  $CO$ , y posteriormente se comprobaron las lecturas de los Cleanspace. Ya que los sensores Cleanspace tomaban lecturas cada minuto, se hizo lo propio con las lecturas del Teledyne. A continuación, *Figura 12*, se muestra un diagrama de bloques de cómo funcionó la prueba de los sensores de la compañía CleanSpace.



*Figura 12.* Diagrama de flujo del funcionamiento de los experimentos de caracterización realizadas con los sensores Aura

Posteriormente se realizaron dos caracterizaciones con los sensores Aura basándonos en la misma prueba hecha con los Airtags. En esta primera caracterización se utilizaron cuatro sensores Airtag de CleanSpace, en la cámara de aire cero, y además había una toma al sensor ya mencionado como referencia, Teledyne. En la *Figura 13* también se puede observar un sensor Langan que se propuso como otra referencia por parte del Centro Mario Molina. Se midió cómo reaccionaban al incremento de  $CO$  en la cámara de aire aislada por dos horas y posteriormente se analizaron los datos. El experimento duró aproximadamente 4 horas.



*Figura 13.* Cámara aislada del laboratorio del CCA con los sensores CleanSpace y dos de los celulares a los cuales estaban conectados para la primera caracterización.

De esta caracterización, *Figura 14*, se pudo encontrar que dos sensores Cleanspace tenían una respuesta similar entre ellos y los sensores de referencia, Teledyne y Langan.

Mientras que uno de ellos siempre tuvo lecturas por arriba de 12 ppm cuando el máximo registrado para los otros 2 sensores fue de 4 ppm.

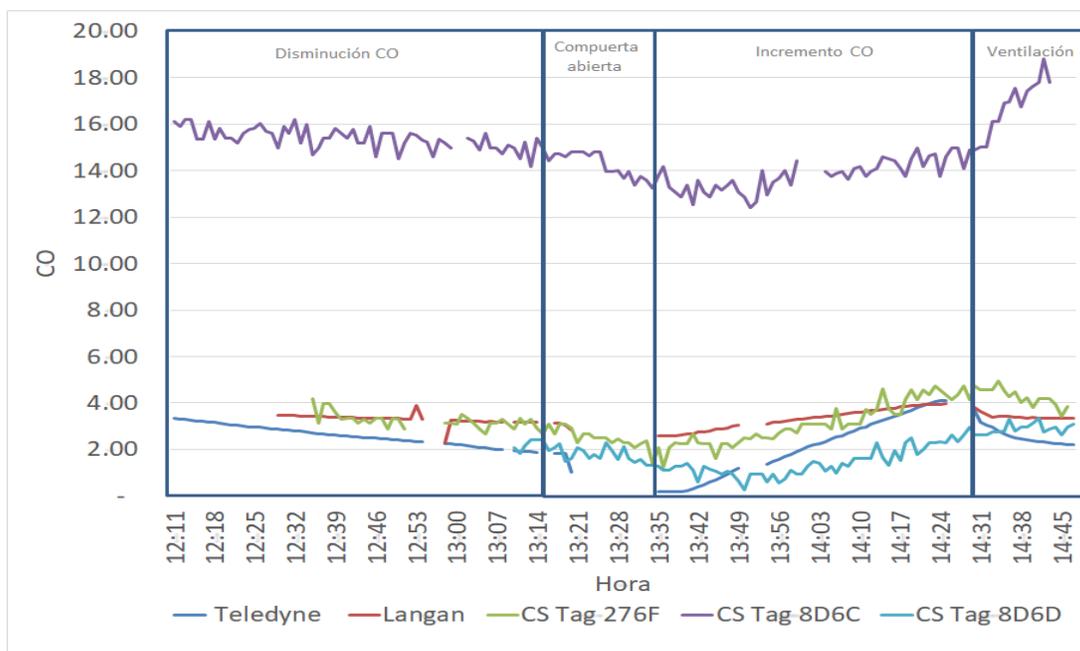


Figura 14. Gráfica con las lecturas de los sensores Airtag de CleanSpace, Langan y Teledyne.

Esto nos permite asumir que este sensor no tuvo la misma calibración de fábrica que los otros, y si la tuvo, se averió o saturó. De cualquier manera, se puede observar que estos sensores funcionaban de manera adecuada y, que además, resultaba ser muy útiles ya que sólo se conectaban al celular y todo se quedaba guardado, ya fuera en la nube, o en el celular. De esta manera, ya que ambos sensores tienen el mismo hardware, se procedió a trabajar con los sensores Aura para desarrollar el arreglo.

#### 4.4.2 PMSA003I

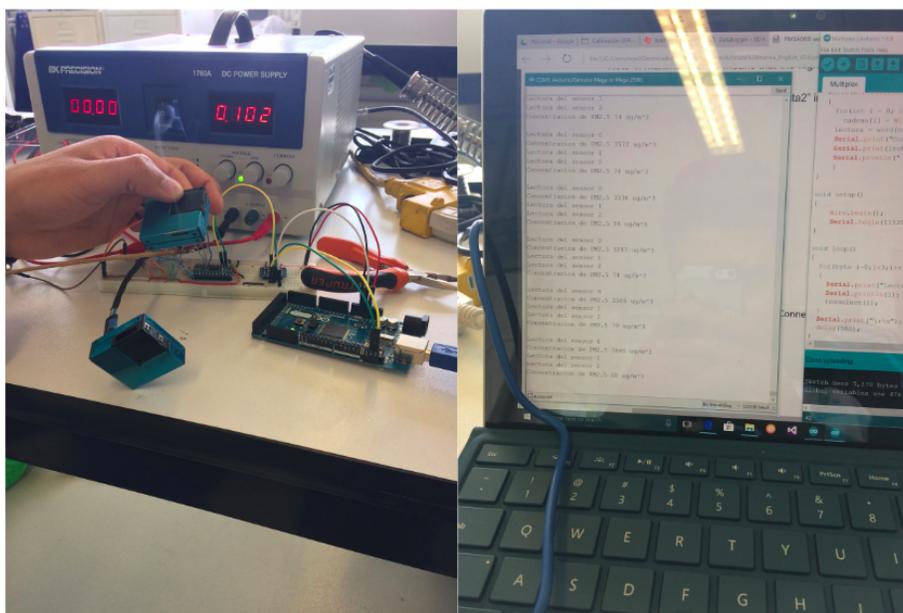
Las pruebas hechas con los sensores Plantower PMSA003I se basaron en el artículo publicado por Yang Wan et al (2015) “Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement”. En este artículo se discuten varios métodos para calibrar sensores de Material Particulado, como se muestra a continuación:

Experimental plan for the evaluation and calibration of the particle sensors PPD, DSM, and GP2Y			
Test no.	Assessment aspect	Source of particles	Reference instruments
1	Linearity of response	Incense burning	SidePak, AirAssure
2	Concentration resolution	Incense burning	SidePak, AirAssure
3	Limit of detection	Incense burning	SidePak
4	Dependence on composition	Atomized NaCl, sucrose, and NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> particles	SidePak, SMPS
5	Sensitivity to particle size	Atomized PSL spheres with 300, 600, 900 nm	SidePak, SMPS
6	RH and temperature influence	Atomized NaCl particles	SidePak, SMPS

Tabla 8. Experimentos realizados a los sensores de Material Particulado en el artículo previamente mencionado [23]

Se optó por utilizar el incienso como método de caracterización ya que cubría las tres primeras pruebas realizadas de la *Tabla 8*, las cuales estaban basadas en estándares de la EPA de EUA y nos permitían tener un primer acercamiento a cómo funcionaban estos sensores. En cuanto se obtuvo una lectura constante de los sensores se realizó una prueba para verificar su correcto funcionamiento y empezar a caracterizarlos. Esta prueba se realizó con en la presencia de dos sensores al mismo tiempo, mediados por un multiplexor. Los sensores tienen el mismo identificador para la tarjeta Arduino, por lo que al incorporar un multiplexor, nos ahorrábamos el tedioso trabajo de cambiar el identificador de cada sensor y mandarlos llamar individualmente.

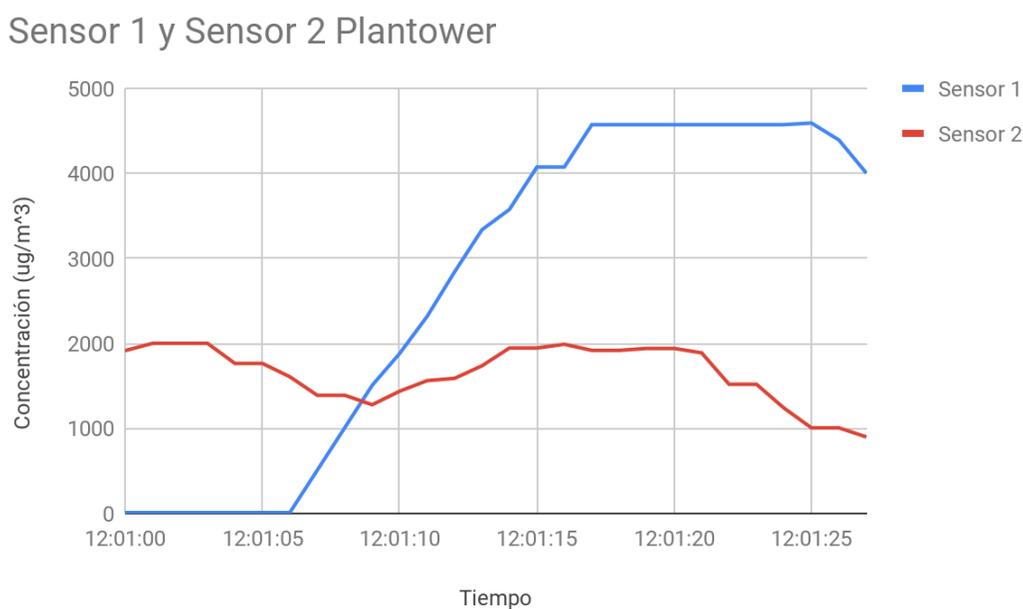
Una vez hecho esto, se procedió a pasar el incienso primero en la toma de aire de un sensor y posteriormente en la toma del otro, viendo cómo reaccionaban las lecturas en el monitor serial, como se puede apreciar en la *Figura 15*, sensores y resultados.



*Figura 15.* Caracterización de los sensores Plantower hecha en el CIA.

Vimos que la multiplexión funcionaba de manera correcta y que las lecturas de los sensores no se entrelazaban entre ellas, por lo que se podrían multiplexar aún más sensores. Esta prueba fue la base para poder desarrollar más adaptadores, y conseguir los elementos del circuito de acondicionamiento de señal. Al estar tratando con una propuesta de un sistema con alrededor de 220 sensores, se procedió a diseñar una PCB con el adaptador y el circuito de acondicionamiento de señal, esto para hacer más eficientes las conexiones y minimizar los errores relacionadas a estas.

También se encontró que el incienso era un muy buen generador de material particulado por lo que se mantuvo como prueba base para los sensores de *MP*. En la *Figura 16* podemos observar el comportamiento de los sensores por un minuto, y vemos que tienen tiempos de respuesta superiores a los sensores de *CO* además de que nos permiten acceder a la información de manera instantánea, por lo que mostraron tener gran potencial. A diferencia de los sensores de *CO* inicialmente no se corroboró contra un sensor de referencia por el hecho de que no se tenía definido el alcance real de los sensores Plantower. En su hoja de especificaciones se menciona que pueden hacer lecturas en un rango efectivo de  $0\sim 500 \frac{\mu g}{m^3}$  de *PM*<sub>2.5</sub>, pero pudimos apreciar que pueden mantener concentraciones de  $0 \frac{\mu g}{m^3}$  hasta  $4500 \frac{\mu g}{m^3}$ , algo muy interesante.



*Figura 16.* Comparación de la Caracterización de los sensores Plantower.

## 4.5 Interfaz de Usuario.

### 4.5.1 Aura

Para este tipo de sensores originalmente se nos había propuesto una plataforma basada en una página de internet en la cual se accedía por medio de un usuario y una contraseña. En esta página se podían ver las lecturas de los sensores en tiempo real y además llegaba un reporte semanal con todas las lecturas de los sensores. El problema fue que esta plataforma no pudo existir, ya que los sensores iban a tener una distancia entre ellos de aproximadamente 10 cm, por lo que se optó por sólo conseguir el reporte de los sensores cada que se hacía una prueba. Gracias a la Cleanspace, se pudo conseguir un código con el cual se accedía a la base de datos con todas las lecturas de los Aura y definiendo los tiempos en horario *unix epoch time*, podíamos obtener las lecturas de los 41 sensores en formato “.csv” el cual es leído por cualquier editor de números en formato de arreglos.

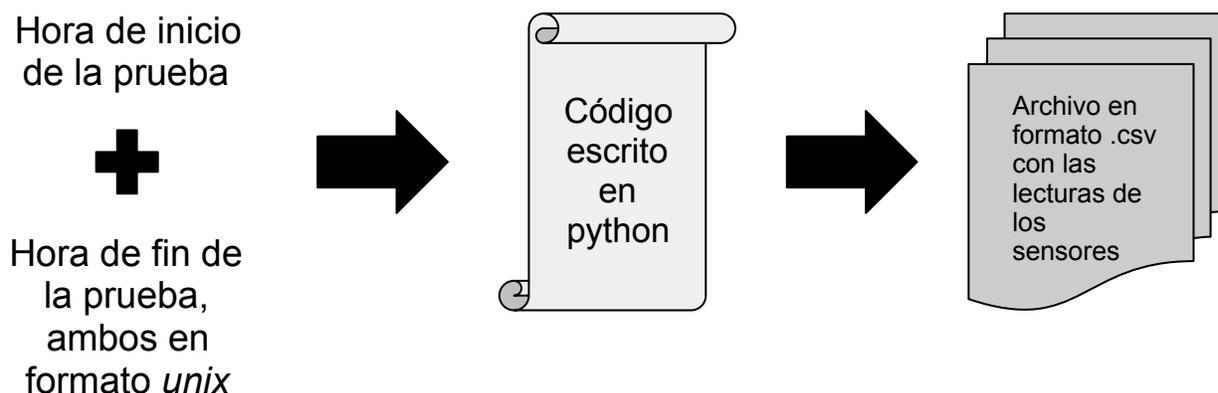


Figura 17. Diagrama de flujo de la manera en la que se obtenían las lecturas de los sensores Aura.

En la *Figura 17* se simplifica la obtención de la información por medio del programa desarrollado en Python obtenido por la compañía CleanSpace. El formato “.csv”, legible en excel o algún programa parecido, nos permitía generar tablas o gráficas con las lecturas de los sensores. Esto se podía volver muy tedioso ya que había lecturas de los sensores cada 10 segundos y existían 41 sensores, por lo que podría haber un máximo 246 lecturas por minuto. Por fortuna, si la lectura del sensor no cambiaba, la base de datos no registraba la lectura en ese tiempo de 10 segundos. Gracias a este programa, se pudo hacer la caracterización de los Aura y analizar su desempeño en los diferentes experimentos que se realizaron con ellos. También se pudo comparar las lecturas de estos sensores con los sensores de referencia y caracterizarlos.

#### 4.5.2 PMSA003I

Al tener unos sensores que se comunican por protocolo  $I^2C$  y tener un microcontrolador como los Arduino, capaces de procesar esta información y desplegarla al instante, se presentaron múltiples maneras para observar las concentraciones. La primera y más sencilla fue por medio del Monitor Serial, en la cual sólo se desplegaba la lectura de cada sensor y se actualizaba cada segundo, dándonos las lecturas de la manera más directa pero sin posibilidad de guardar la información una vez cerrado el Monitor Serial.

La segunda opción también contaba con atributos del sistema Arduino, algo llamado el Serial Plotter. Con esta manera de observar la información se obtienen gráficas en tiempo real con las lecturas de los sensores. De esta manera, podíamos observar gráficamente los cambios instantáneamente pero no podíamos acceder a los valores específicos, la gráfica se autoajusta para las diferentes lecturas y sólo se puede obtener un aproximado. Otra desventaja es el hecho de que al estar habilitado el Serial Plotter, el Monitor Serial no puede ser accedido por lo que no se pueden guardar las lecturas que se están desplegando dejándonos sólo la opción de hacer tomas de pantalla o utilizar algún programa para grabar cómo se comportan los sensores cuando están en el Serial Plotter.

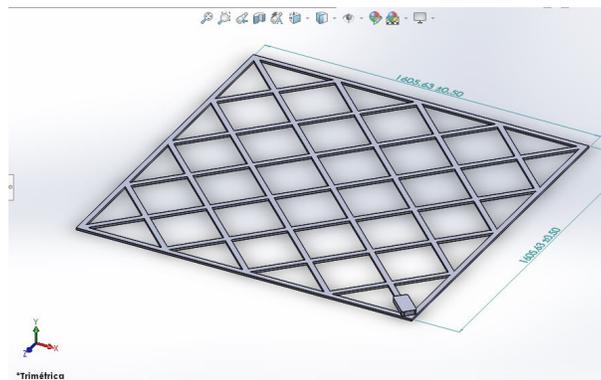
Al no poder acceder a la información de una manera sencilla después de los experimentos, nos dimos a la tarea de utilizar un sistema que nos permitiera visualizar las concentraciones en los sensores y también fuera capaz de guardar esta información para un postproceso después de hacer lecturas. Por facilidad y conocimiento previo, se optó por desarrollar un programa LabVIEW el cual nos permitía no sólo generar un archivo con la información recopilada, sino que además, basándonos en un proyecto realizado en el laboratorio MADiT por el ingeniero mecatrónico Leonardo Jaimes, se podía observar el cambio de concentraciones en un mapa de calor, el cual cambiaba de tonos azules para bajas concentraciones hasta rojos para concentraciones muy altas. A continuación se muestra en la *Figura 18* una captura de pantalla de cómo quedó dicho programa. Al ya tener resuelta toda la parte de instrumentación, se procedió a enfocarnos en los sistemas mecánicos que le darían soporte a todo el sistema.



*Figura 18.* Cambio de concentración de PM2.5 mostrado en la interfaz gráfica desarrollada en LabView. Desarrollado por los estudiantes del CIA, de Maestría Dario Reyes e Israel Gil de Mecatrónica.

## 4.6 Sistema Mecánico.

La primera idea del banco de pruebas fue de generar una pared en la cual se pondrían los sensores. Basándonos en esta idea, primero se desarrolló una propuesta en SolidWorks 2010, *Figura 19*, la cual fue enviada a la compañía MOAS, generando dos mallas de un metro cuadrado de área con rieles para la adecuación de los sensores. Esto se realizó por medio de fundas diseñadas primero en el SolidWorks 2010 y luego creadas por manufactura aditiva.

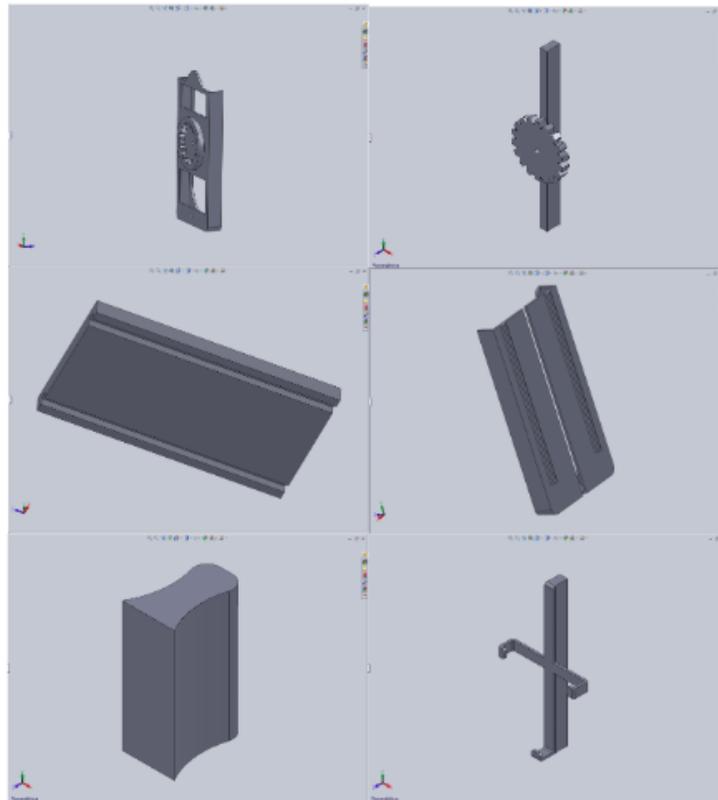


*Figura 19.* Propuesta de reja desarrollada en el software SolidWorks 2010.

### 4.6.1 Aura

Enfocándonos en las fundas de los sensores Aura, se desarrollaron 5 iteraciones de fundas en el programa SolidWorks de CAD, las cuales se fueron especializando conforme se hacían las primeras caracterizaciones y posteriormente las pruebas en el túnel de viento. De las 5 iteraciones la única que se fabricó fue la primera, ya que estaba diseñada para encajar en las mallas que se mandaron a construir a MOAS.

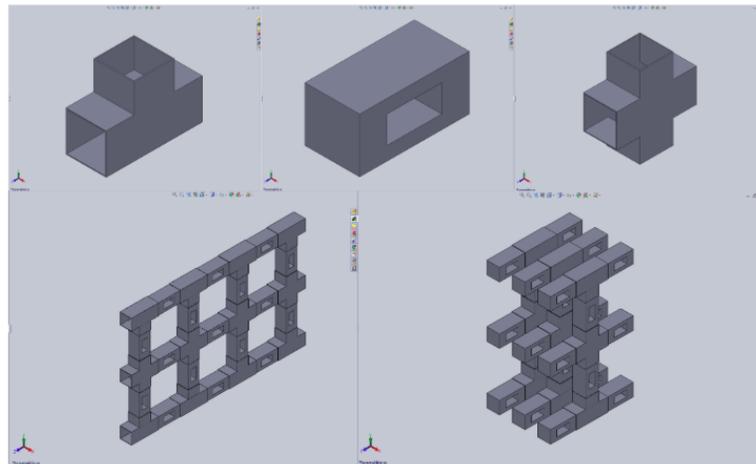
Una vez que se consiguieron las mallas, se procedió a fabricar la funda para mostrar cómo encajaría con los sensores y cómo esta a su vez encajaría en las mallas. Se vio que la funda tenía juego con los rieles por lo que se hicieron las otras iteraciones, las cuales se pueden observar en la *Figura 20*. Las primeras dos imágenes, viendo de arriba hacia abajo, nos muestran una funda con la opción de poder rotarla a lo largo de su empalme, con la funda y su conexión a las mallas. Las siguientes tienen el mismo funcionamiento de empalme sin rotación, y las últimas dos son diseños más aerodinámicos y sin el uso de tanto material. Cabe mencionar que la primera iteración de las fundas funcionó para sujetar y probar los sensores en el túnel de viento, por lo que tuvo una aplicación aunque no fuera para lo que fue diseñada.



*Figura 20.* Diferentes Iteraciones de las fundas para los sensores CleanSpace desarrollados en el software SolidWorks 2010.

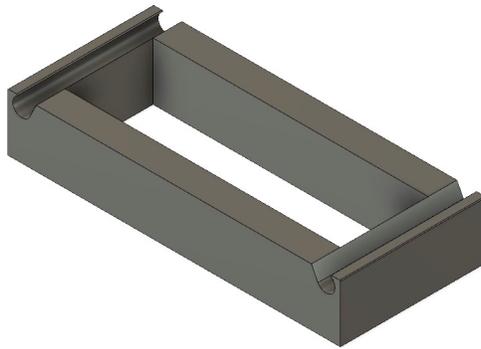
#### 4.6.2 PMSA003I

Al vernos en la necesidad de usar nuevos sensores, se generaron varias propuestas de cómo realizar la malla para sostenerlos, una idea que se propuso fue desarrollar fundas que a la vez fueran la estructura, *Figura 21*, permitiéndonos armarlas por bloques, teniendo así la opción de variar la presentación y arreglo de los sensores. Esta opción al final no fue la adecuada ya que las estructuras como tal, generarían mucha turbulencia para la lectura de los sensores y además, se utilizaría mucho material a la hora de crearlas en las máquinas de Manufactura Aditiva.



*Figura 21.* Propuesta de fundas y arreglo para los sensores Plantower desarrollados en el software SolidWorks 2010.

Basándonos en todas las propuestas anteriores, se llegó a la conclusión que la funda más sencilla y útil, sería una lo suficientemente delgada para no molestar las lecturas del sensor, y a la vez que tuviera la rigidez necesaria para que el sensor no se estuviera moviendo a la hora de hacer lecturas, como se muestra en la *Figura 22*.



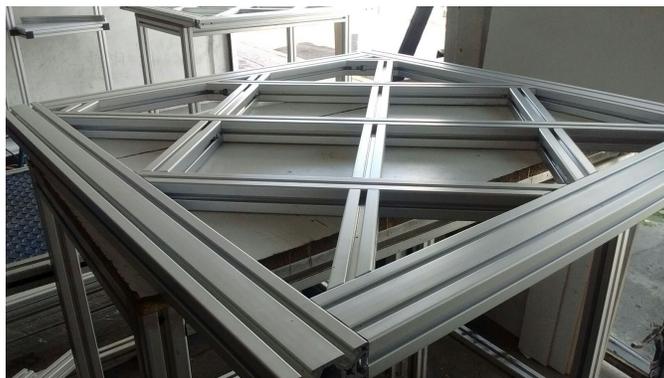
*Figura 22.* Funda diseñada en Autodesk Fusion 360 para el prototipo demostración.

Como se puede observar esta funda utiliza muy poco material, además de que tiene las dimensiones necesarias para que los sensores embonen por el orificio de en medio sin necesidad de un elemento de fijación. Esto sería con pura presión del dedo se pueden meter y posteriormente sacar una vez realizada la prueba. Considerando que también al hacer las pruebas finales, los sensores no contaban con las PCBs que se mandaron construir para simplificar las conexiones, vemos que estas fundas fueron bastante útiles para no afectar los cables y la conexión que surgieron de la parte posterior de los sensores.

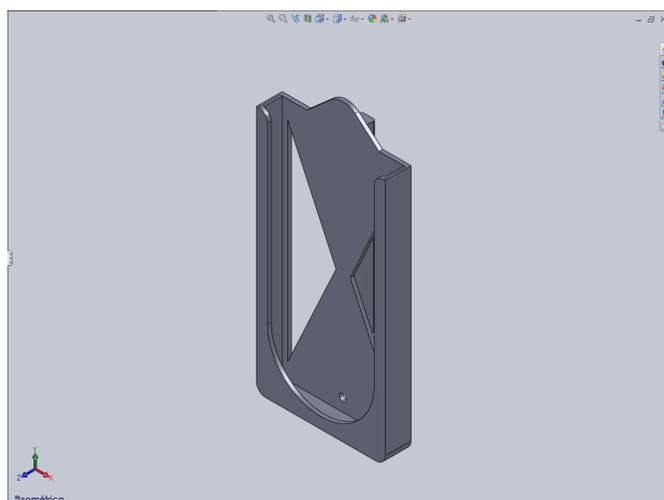
## 4.7 Fabricación de concepto.

### 4.7.1 Aura

Se desarrollaron dos mallas de aluminio de un metro por un metro por parte de la compañía MOAS, *Figura 23*, y estas sirvieron de base para la realización de las fundas de los sensores Aura de CleanSpace. Como ya se mencionó, sólo se construyó la primera iteración de las fundas para estos sensores, *Figura 24*.



*Figura 23.* Malla realizada por la compañía MOAS.



*Figura 24.* Funda construida para los sensores Aura de CleanSpace diseñada en SolidWorks 2010.

#### 4.7.2 PMSA003I

Para mostrar la prueba de concepto de los sensores y el arreglo propuesto, se decidió generar un prototipo funcional, que mostraría los alcances y avances del proyecto. Se utilizó una malla para limitar el acceso a animales en el hogar como la estructura base y se fabricó un soporte de madera para mantenerla a cierta altura. En la *Figura 25* se aprecia el arreglo con 8 sensores, los cables que lo conectan al microcontrolador, la malla donde se sujetaron los sensores y la computadora en donde se mostró en un mapa de calor con las concentraciones de  $PM_{2.5}$  a de cada sensor. Con el mapa de calor funcionando, pudimos observar que aún cuando estábamos alejados del arroyo vehicular, las emisiones de los vehículos llegaban a medirse en el prototipo.



*Figura 25.* Prototipo funcional con los sensores en sus fundas y una computadora en la cual se mostraba el mapa de calor desarrollado en LabView presentado en el jardín del CCA.

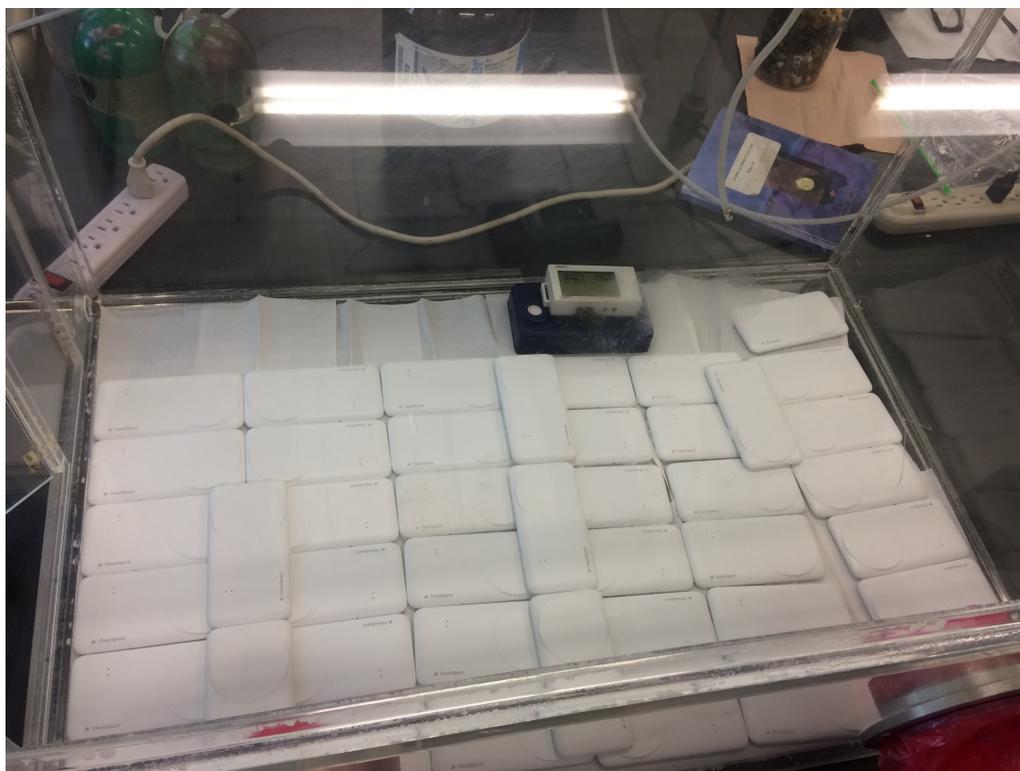
## Capítulo 5

### Evaluación

#### 5.1 Experimentos Realizados.

##### 5.1.1 Aura

La primera prueba se realizó con 41 sensores Aura y los sensores de referencia, cómo se puede observar en la *Figura 26*, todos los sensores estaban prácticamente en la misma posición para evitar errores, se intentó incorporar un ventilador para homogeneizar la concentración en toda la cámara pero por desgracia no se podía sin permitir el escape del aire de la cámara. En esta prueba se generó un incremento excesivo de *CO* y posteriormente se fue limpiando el *CO* del ambiente de la cámara aislada hasta tener bajas lecturas de *CO*. El experimento duró 2 horas.



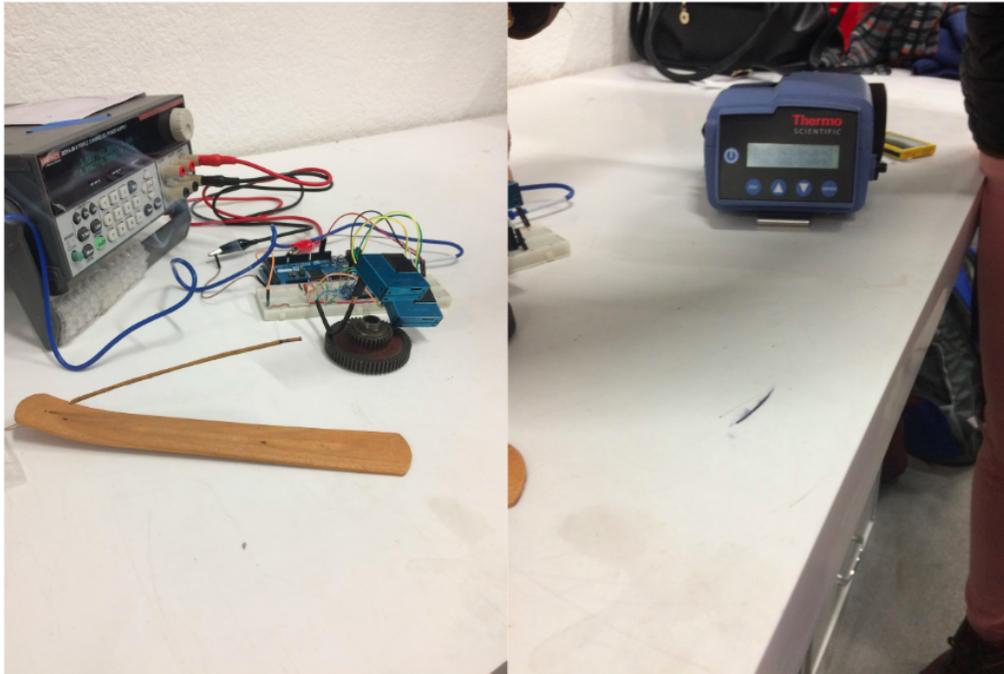
*Figura 26.* Cámara aislada del laboratorio del CCA con los sensores Aura y el sensor Langan para la segunda caracterización.

La segunda caracterización que se hizo con estos sensores fue para encontrar qué sensor Aura mandaba cuál lectura ya que no se tenía ninguna manera de encontrar cuál lectura de la hoja de datos era para cada sensor físico. Esto se debía a que los números de serie en los dispositivos físicos, no correspondían a los identificadores que venían en la hoja de datos con las lecturas de *CO* y Temperatura. Esto se logró metiendo individualmente cada sensor Aura a la cámara aislada por cinco minutos, anotando el número de serie y el tiempo que estuvo adentro de la caja, para posteriormente cotejar con la base de datos para ese tiempo. El experimento duró aproximadamente 4 horas.

### **5.1.2 PMSA003I**

También se realizaron 2 pruebas de caracterización de los sensores Plantower PMSA003I. Como previamente se mencionó, nos basamos en el artículo de investigación de Yang Wan et al (2015) para caracterizar sensores de bajo costo de Partículas Suspendedas. Aunque el artículo se basa en varias técnicas para evaluar estos sensores, nos enfocamos en la más simple y útil, que fue utilizar incienso como método para generar Material Particulado.

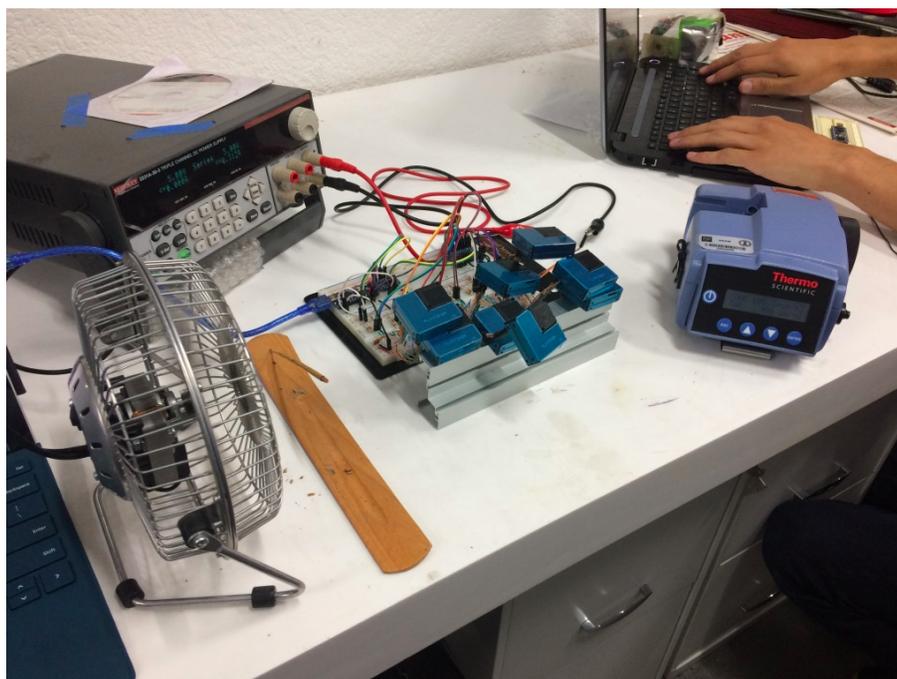
El primer experimento constó en comparar la lectura de 8 sensores Plantower con respecto a un pDR, el cual se utilizó como lectura de referencia. Esto se realizó por aproximadamente 30 minutos y además del incienso, se agregó un ventilador el cual funcionó de manera intermitente.



*Figura 27.* Primer experimento de los sensores Plantower con un pDR de referencia.

En la *Figura 27* se muestra el arreglo de los sensores con la fuente de poder que les administraba energía y el incienso del lado izquierdo, y en la derecha el pDR el cual funcionó como referencia para esta caracterización.

En el segundo experimento, se utilizó un arreglo de 8 sensores Plantower, un pDR, un ventilador e incienso. Funcionaron de manera continua, en la *Figura 28* se puede observar el acomodo de todos los elementos. Primero se tomaron lecturas de los sensores por 5 minutos con la información presentada de manera de texto, y posteriormente se visualizaron por medio de una gráfica, de esta manera, se pudieron comparar primero las lecturas contra el pDR y después las lecturas entre los sensores. También se probó cómo los sensores desplegarían las lecturas por medio de un mapa de calor y programa realizado en LabView.

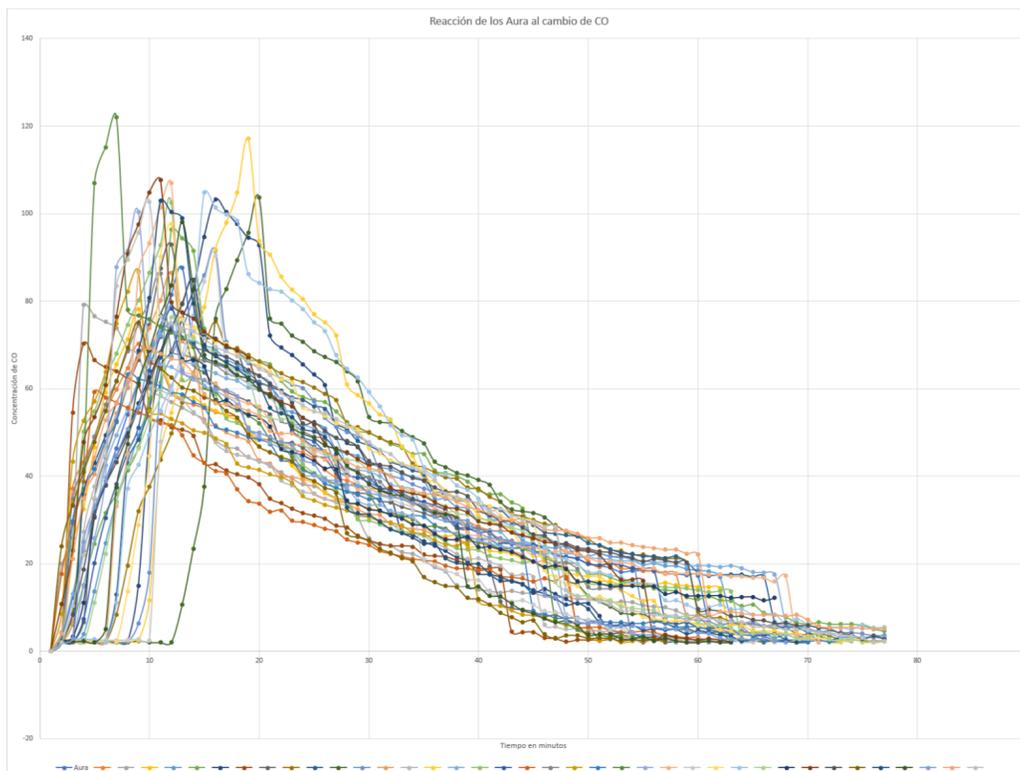


*Figura 28.* Segundo experimento de los sensores Plantower con un pDR de referencia.

## 5.2 Reporte de pruebas.

### 5.2.1 Aura

En el primer experimento logramos sacar múltiples conclusiones. La primera fue que el tercer experimento sería inminente ya que sin saber cuál sensor marcaba qué lectura, no podríamos hacer una buena caracterización de éstos. Además de que dos sensores no enviaban lecturas, y no se podía ubicar cuales sensores eran los dañados. Se puede observar en la *Figura 29* que estos sensores reaccionan de manera parecida al incremento en *CO* de la cámara, lo que nos daba esperanza.



*Figura 29.* Gráfica que muestra la reacción de tiempo de los sensores Aura en la segunda caracterización.

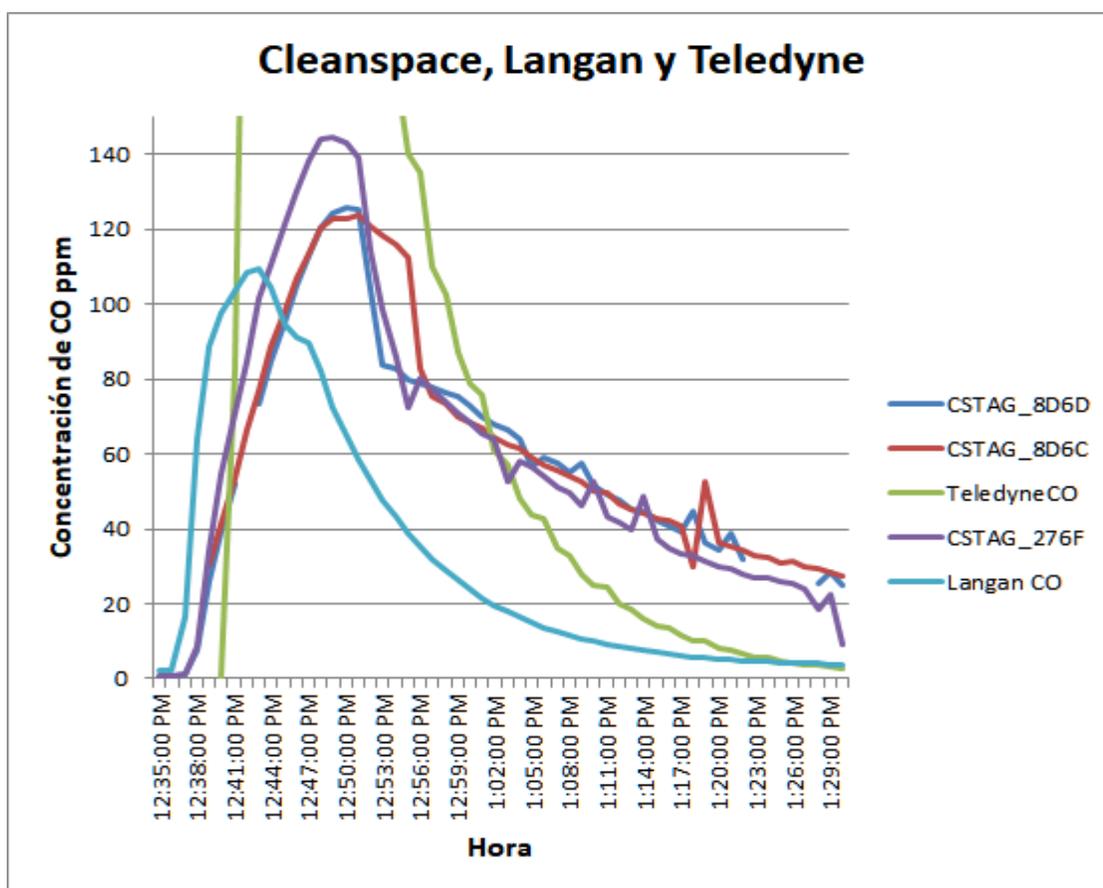


Figura 30. Comparación de las lecturas de dos sensores Aura y los sensores de referencia de la segunda caracterización.

Sin embargo, en la *Figura 30* se muestra que las limitaciones de los rangos de lectura de los sensores Aura, son muy bajas en comparación con los sensores de referencia, tardando cerca de 5 minutos en reaccionar y además marcando concentraciones muy por debajo de las reales.

Del tercer experimento se pudo encontrar el sensor y su identificador específico para 38 sensores Aura, lo cual fue muy útil ya que así podría definirse un espacio con ellos, y saber qué lectura había en ubicaciones específicas. Sin embargo, las dudas permanecían con respecto a saber si de verdad cada sensor estaba enviando las lecturas que se le habían asignado a cada uno.

Estos sensores tienen error en sus lecturas cercanas al 100%. Al estar caracterizándolos, en una ocasión marcaban 2-5 ppm, cuando en la cámara se tenía una concentración cercana a 0.1 ppm. En otra ocasión se tuvo una concentración de 500 ppm y además de marcar concentraciones cercanas a las 20 ppm, tardaron cerca de 5 minutos, si llegaron a cambiar, para que todos notaran el cambio en concentración y “avisaran” que se tenían concentraciones peligrosas. Aunado a esto, la compañía nunca pudo darnos una manera eficiente de encontrar la lectura individual de cada sensor en la base de datos, dejándonos el trabajo a los integrantes del proyecto, volviendo inadecuada la participación de estos sensores en el trabajo de investigación.

### 5.2.2 PMSA003I

En el segundo experimento se obtuvieron resultados muy alentadores pero sólo hasta el postproceso de las lecturas de los sensores. Estos resultados tardíos se debieron a que nunca se definió una hora de inicio para el experimento, y aunque se tenían las horas de referencia en el pDR y la computadora, el bloque de información de las lecturas no contaba con ello. Sin embargo, la *Figura 31* muestra cómo prácticamente los sensores Plantower tienen la misma reacción a los contaminantes que el pDR, aun cuando no marcaron el mismo valor del pico de más de  $6000 \frac{\mu g}{m^3}$  del pDR, vemos que estos sensores son increíblemente parecidos en tiempos de respuesta, por lo que los vuelve muy buenos candidatos para la malla que se pretende generar con ellos.

Aun cuando no den los valores exactos de los excesos de contaminación, vemos que nos darán una respuesta adecuada al incremento en contaminación y se podrá observar en tiempo real, ya sea por medio del monitor serial o por una interfaz gráfica con mapas de calor.

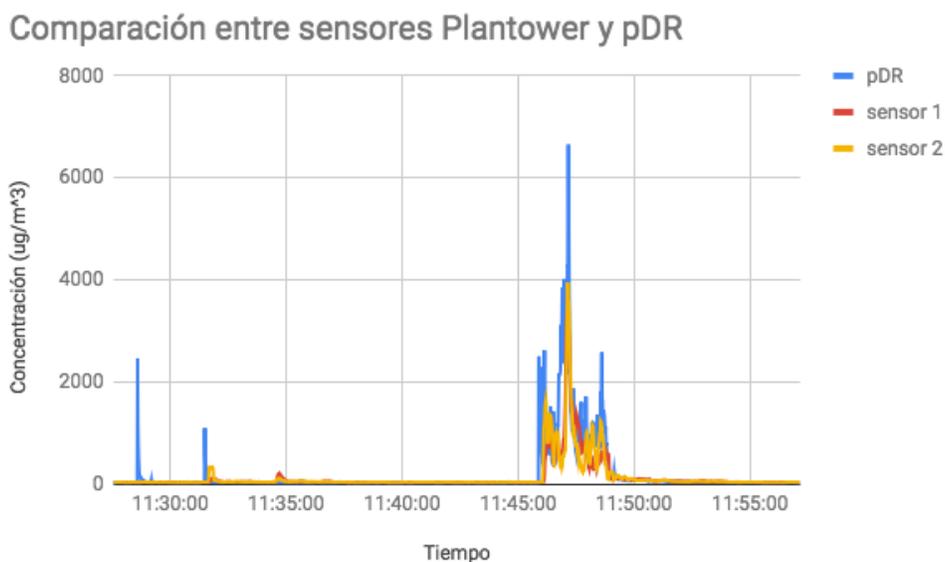
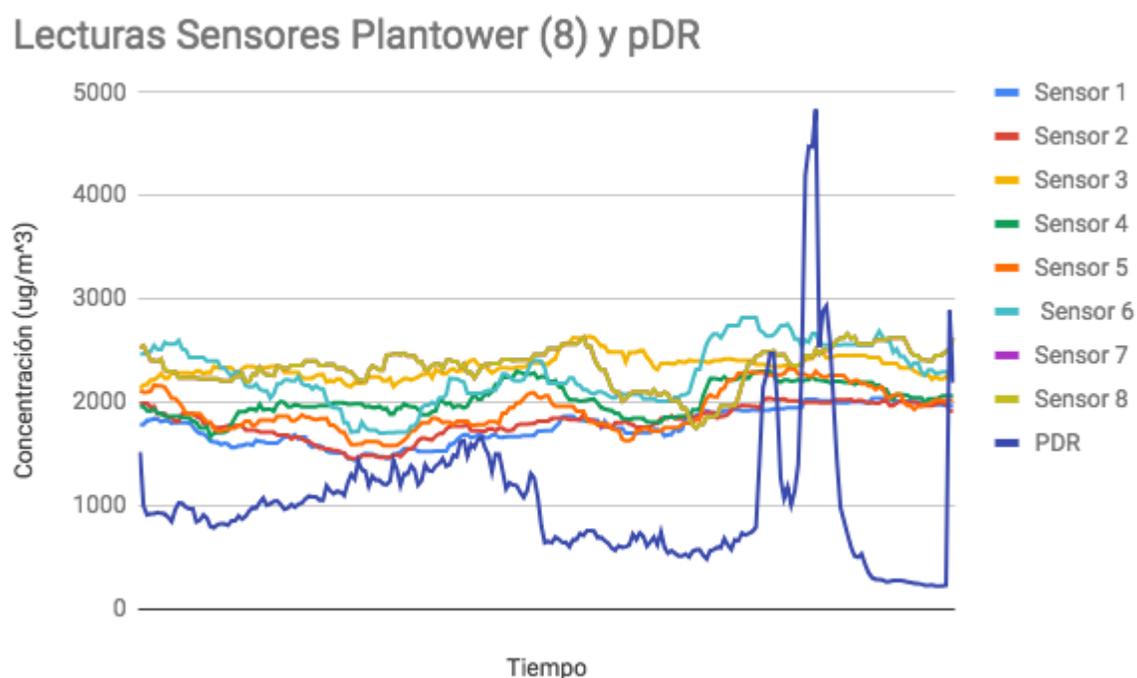


Figura 31. Segunda Caracterización de dos sensores Plantower comparándolos con un pDR de referencia.

Del tercer experimento se pueden obtener varias conclusiones. Como el experimento se desarrolló con una fuente constante de partículas suspendidas y de flujo de éstas, vemos cómo reaccionaron los ocho sensores Plantower que se utilizaron. Se puede observar en la Figura 32 que aunque las lecturas se asemejan entre los sensores, ninguna de estas es equivalente a la del sensor pDR. Esto no es algo negativo si se considera que el flujo primero pasó por los sensores Plantower y al final de ellos estaba el pDR, y que conforme se iba consumiendo el incienso se tuvo que mover para que siempre estuviera presente en el flujo de aire.

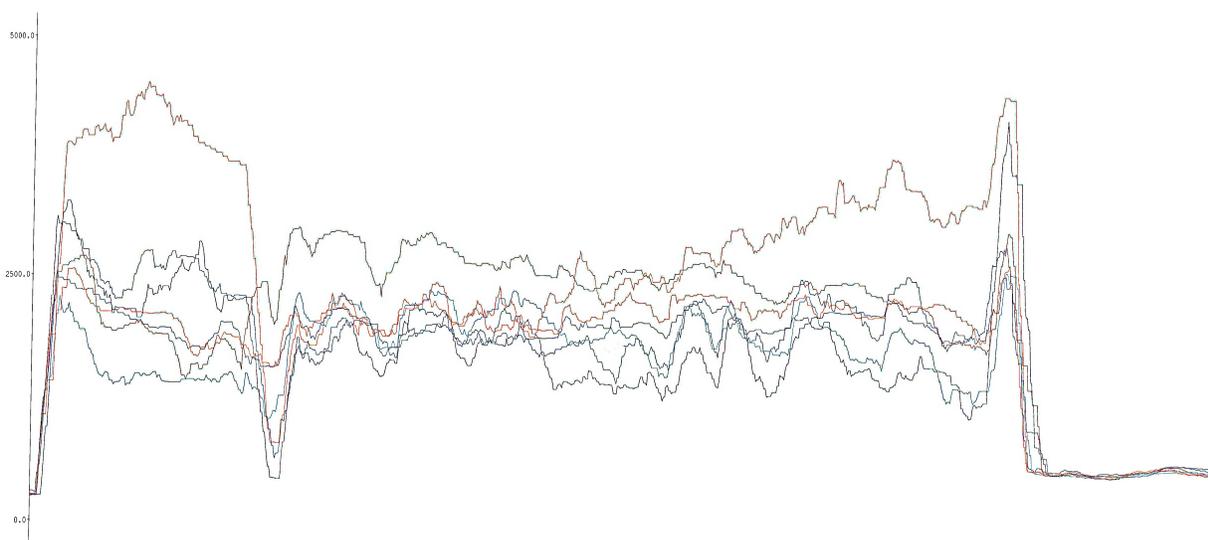
Sin embargo, se puede ver que los sensores y el pDR se comportaron de manera parecida aunque no tuvieran las mismas lecturas, por lo que se reitera la utilidad de estos sensores, *Figura 32*. El único problema sería el pico que no se presentó en los sensores, lo que podría ser un indicador de saturación de los Plantower aunque también hay que tomar en cuenta las posiciones estos y del pDR.



*Figura 32.* Tercera Caracterización con 8 sensores Plantower comparándolos con un pDR de referencia, tiempo aproximado de la prueba 5 minutos.

Al enfocarnos en las lecturas de los sensores y las discrepancias entre ellos, podemos ver que la *Figura 33* nos muestra una tendencia similar entre ellos pero que varía en momentos importantes, esto se debe principalmente a que varios sensores estuvieron escalonados por lo que tenían lecturas parecidas, pero no exactamente las mismas.

Aun así, vemos que los sensores marcaron lecturas desde  $0 \frac{\mu g}{m^3}$  hasta inclusive valores que sobrepasaron las  $4000 \frac{\mu g}{m^3}$ . Esta prueba fue de mucha importancia ya que podemos observar que los sensores pueden variar de altas concentraciones de Material Particulado a bajas sin perder referencias. Sin embargo, antes de concluir que estos sensores son la mejor opción, se debería verificar que los sensores no lleguen a saturarse rápidamente ya que, considerando lo variable que puede llegar a ser el flujo vehicular, podríamos tener problemas de saturación a la hora de hacer las pruebas en campo.



*Figura 33.* Tercera Caracterización de los sensores Plantower comparación de la respuesta entre los 8 sensores a lo largo de 5 minutos.

Estos sensores han sido muy útiles ya que se puede acceder a las lecturas de una manera eficiente y rápida. Aunque haya habido discrepancias entre los sensores y el pDR, vemos que serán muy útiles en el trabajo a futuro. Generar PCB's ayudará a que sean aún más útiles.

## **Conclusiones.**

El trabajo que se desarrolló es multidisciplinario, juntando áreas como química de la atmósfera, diseño de mecanismos y electrónica. e ha cumplido con el objetivo ya que se logró obtener un prototipo funcional. Este trabajo ha sentado las bases para poder escalar el sistema y obtener una primera iteración del sistema completo funcionando.

Las metas expuestas en los alcances se han cumplido: Se investigó la tecnología que existe para medir contaminantes atmosféricos y su importancia para la salud y el medio ambiente urbano. Aunado a esto, se propuso y desarrollaron dos bancos de pruebas, uno para los sensores Aura y otro para los sensores Plantower. Gracias a las pruebas previas de caracterización, vimos que los sensores Aura no eran una buena opción para el objetivo de este proyecto, por lo que se reformuló el proyecto y se optó por los sensores Plantower para continuar la investigación.

Además, se desarrolló un programa en el software de visualización de datos LabView, en el cual se pueden observar las lecturas en tiempo real de los sensores de PM2.5, como un mapa de calor el cual se puede expandir para agregarle la lectura de más sensores. Con estos trabajos se desarrolló un prototipo funcional el cual nos mostró que el trabajo realizado es viable para caracterizar la contaminación cerca del el arroyo vehicular.

## **Trabajo a Futuro**

Se prevé extrapolar los multiplexores y se están probando los sensores MQ2 de CO para verificar si hay correlación entre CO y PM2.5. Todo este trabajo a futuro será realizado entre los estudiantes del MADiT, el CIA y del CCA.

Basándose en la facilidad de poder multiplexar lecturas, se conectarán 8 sensores a cada multiplexor generando un módulo de lectura vertical u horizontal en una estructura de 2x2m. Este módulo a su vez enviará las lecturas a otro multiplexor el cual podrá recibir lecturas de hasta 8 módulos, permitiéndonos así tener un arreglo de 64 sensores por sección, todos controlados por un Arduino Nano. Este enviará lecturas junto con otros 3 sistemas a un Arduino Mega. Así se podrá observar cómo se dispersan los contaminantes vehiculares en una acera, observando el flujo en tiempo real por primera vez. Todo esto se haría con tarjetas impresas y la menor cantidad posible de cables, para obtener lecturas constantes y hacer experimentos en campo con certeza. Este sistema será lo más autónomo posible para que pueda ser empleado en muchos lugares y a generar información útil para diseño urbano e información para la población.

Después de analizar la forma en la cual se transportan los contaminantes en una acera, se tendrá información para que la Facultad de Arquitectura proponga barreras para mitigar la exposición de contaminantes a los transeúntes.

## Bibliografía

- (1) Inventario de Emisiones de la CDMX 2016, contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero, publicado por la Secretaría del Medio Ambiente del gobierno de la Ciudad de México, obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/>
- (2) Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2017, publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, formato electrónico, obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825097912>
- (3) Topographic map, recurso en línea: <http://en-ca.topographic-map.com/places/Mexico-City-2744207/6>
- (4) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, Gobierno de México, Consulta Temática, Índice Metropolitano de la Calidad del Aire IMECA, [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_R\\_AIRE01\\_04&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce).
- (5) K. Boguski, Terrie, P. E, (2006) “Understanding Units of Measurement”, Environmental Science and Technology, Briefs for Citizens, Center for Hazardous Substance Research, Issue 2, Kansas State University.

- (6) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-2014, SALUD AMBIENTAL. VALORES LÍMITE PERMISIBLES PARA LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS PM10 Y PM2.5 EN EL AIRE AMBIENTE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN.
- (7) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SSA1-1993. "SALUD AMBIENTAL. CRITERIO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE CON RESPECTO AL MONÓXIDO DE CARBONO (CO). VALOR PERMISIBLE PARA LA CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) EN EL AIRE AMBIENTE, COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN A LA SALUD DE LA POBLACIÓN".
- (8) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-023-SSA1-1993. "SALUD AMBIENTAL. CRITERIO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE, CON RESPECTO AL DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO<sub>2</sub>). VALOR NORMADO PARA LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO<sub>2</sub>) EN EL AIRE AMBIENTE, COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN A LA SALUD DE LA POBLACIÓN".
- (9) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-022-SSA1-2010, SALUD AMBIENTAL. CRITERIO PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE, CON RESPECTO AL DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>). VALOR NORMADO PARA LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>) EN EL AIRE AMBIENTE, COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN A LA SALUD DE LA POBLACIÓN.

- (10) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-020-SSA1-2014, SALUD AMBIENTAL. VALOR LÍMITE PERMISIBLE PARA LA CONCENTRACIÓN DE OZONO (O<sub>3</sub>) EN EL AIRE AMBIENTE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN.
- (11) Informe de la Calidad del Aire de la CDMX 2016, Dirección de Monitoreo Atmosférico, publicado por la Secretaría del Medio Ambiente del gobierno de la Ciudad de México, obtenido de [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe-2016-calidad-del-aire-en-la-ciudad-de-mexico/mobile/informe\\_anual\\_calidad\\_aire\\_2016.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe-2016-calidad-del-aire-en-la-ciudad-de-mexico/mobile/informe_anual_calidad_aire_2016.pdf)
- (12) Organización Mundial de la Salud, Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?jsessionid=E9D32DF8787D3B2DEA84B0063264B86E?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?jsessionid=E9D32DF8787D3B2DEA84B0063264B86E?sequence=1)
- (13) NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-038-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN EL AIRE AMBIENTE Y LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.
- (14) Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México, Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, Red Automática de Monitoreo Atmosférico, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/objetivos-redes/objetivos-monitoreo-calidad-aire-rama.html>.

- (15) Turner, John y Hill, Martyn. (1999). Instrumentation for Engineers and Scientists. *Oxford Science Publications*, Textbooks in Electrical and Electronic Engineering (8), Capítulos: 1, 8, 9, 10 & 11.
- (16) Anjanappa M, Datta K y Song T. (2002) Introduction to Sensors and Actuators, University of Maryland Baltimore County, CRC Press LLC. 16.1.
- (17) Sberveglieri G. (1992) Gas Sensors, Principles, Operations, Thin film Laboratory, University of Brescia, Italy, Springer-Science+Business Media B.V. Capítulos: 9 & 10.
- (18) Google Aclima, Alphabet, <http://insights.aclima.io/>.
- (19) Specs sensors, Specs, <https://www.spec-sensors.com/shop/>.
- (20) Drayson technologies, CleanSpace, <https://our.clean.space/>.
- (21) Robert Llewellyn, [fullychargedshow], (2016, 14 de Julio), *CleanSpace | Fully Charged*, obtenido de: <https://www.youtube.com/watch?v=4C1zjblLyI>.
- (22) Zhou Yong, [PLANTOWER], (2018, 2 de Febrero), *Digital universal particle concentration sensor*, Version 2.6, Verifier Zheng Haoxin.
- (23) Yang Wang, et al. (2015). Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement, *Aerosol Science and Technology*, 49:11, 1063-1077, DOI: 10.1080/02786826.2015.1100710.