



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Monitoreo de la radiación
ultravioleta para controlar el
flujo de agua en un reactor
fotocatalítico**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero mecatrónico

P R E S E N T A

Aldo Emmanuel González López

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Álvaro Núñez Flores



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. GABRIEL ASCANIO GASCA
Secretario: MTRO. JUAN MARIA DE LA SALUD OCARIZ CASTELAZO
Vocal: M.I. ALVARO NUÑEZ FLORES
1er Suplente: ING. NOE ALFREDO MARTINEZ SANCHEZ
2do Suplente: DR. ALBERTO SANDOVAL GARCIA

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), UNAM.

TUTOR:

M.I. Álvaro Núñez Flores

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Álvaro Núñez Flores', written over a horizontal line.

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco a mi familia que siempre está ahí para apoyarme en todos mis proyectos.

A mis profesores de la UNAM que han aportado en gran parte a mi formación y que me motivan cada día a ser mejor profesionista y persona, que inculcaron en mí un sentido de responsabilidad social, al maestro Álvaro Núñez Flores, por su tiempo, ayuda y amistad en todo este camino. Al profesor Juan Ocáriz Castelazo, por su apoyo y correcciones en el ámbito personal y educativo, he aprendido mucho de usted. Al maestro Yahvé Abdul Ledezma que es un ejemplo de un excelente docente y que me ha brindado un gran apoyo como profesor y como jefe.

También agradezco el apoyo del doctor Gabriel Ascanio Gasca, por su confianza ante los proyectos. A todo el personal del ICAT que me ha aceptado como un alumno más y que sin el apoyo de los trabajadores, técnicos y docentes no podría haber logrado esto.



INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

RESUMEN

El agua es un recurso invaluable para la humanidad, sin embargo, con el uso de elementos creados por el hombre, como lo son productos de limpieza y medicamentos han surgido contaminantes llamados emergentes que se encuentran dentro de aguas de desperdicio. Aunado a esto, el mal tratamiento que se le da al agua en los países en vías de desarrollo provoca un mayor número de enfermedades en las comunidades cercanas a los lugares donde el agua con escaso tratamiento es utilizada para irrigación.

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son una solución para poder eliminar los contaminantes emergentes de las aguas tratadas, uno de los POA más importantes, por su eficacia y la abundancia de materia prima, es el proceso fotocatalítico con TiO_2 , que solo necesita de un semiconductor (TiO_2) y la presencia de energía en forma de radiación ultravioleta (la fuente puede ser natural: radiación solar o artificial: lámparas ultravioletas).

En este trabajo se presenta el seguimiento al proyecto realizado en el ICAT (Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología) sobre un reactor fotocatalítico, este reactor trabaja de manera manual para poder regular el flujo de agua con una válvula de globo; y aquí se presenta una solución para poder monitorear la radiación solar en tiempo real, con el fin de controlar el flujo del sistema de manera automática, para mejorar el proceso fotocatalítico de acuerdo con las condiciones ambientales.



ÍNDICE

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

RESUMEN	1
ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	4
INTRODUCCIÓN	5
Descripción del problema a resolver.	6
Objetivo.	7
Relevancia y justificación.	7
Alcances y limitaciones.	7
Método	7
Resultados esperados	8
ANTECEDENTES	9
Disponibilidad y usos del agua en el mundo	9
Disponibilidad y problemas de contaminación de agua en México.	14
Contaminantes emergentes.	16
Sistemas de tratamiento de agua	16
Procesos de Oxidación Avanzada	17
Fotocatálisis heterogénea	18
Radiación ultravioleta (UV)	19
Radiación solar en Ciudad de México.	20
METODOLOGÍA	22
Especificaciones del sistema	23
Sistema Mecánico	23
Estructuras	24
Sistema electrónico	25
Sensor de radiación ultravioleta.	25
Controlador de motor paso a paso.	26
Microcontrolador	28
Control y programación.	28
RESULTADOS	32
Curvas de radiación ultravioleta.	32
Curvas de calibración del motor.	35



INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

CONCLUSIONES	36
TRABAJO A FUTURO	37
BIBLIOGRAFÍA	38
ANEXOS	39
ANEXO 1: HOJAS DE DATOS DEL SENSOR ML8511	39
ANEXO 2: HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL MOTOR 103H7121-XXXX.	46



INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1 Distribución del agua en el mundo. Tomada de SEMARNAT 2016.	10
Figura 2 Agua superficial disponible a nivel mundial en 2010. Adaptada de Burek 2016.	10
Figura 3 Agua superficial disponible a nivel mundial en 2050. Adaptada de Burek 2016	11
Figura 4 Demanda global de agua por sector. Adaptada de UNESCO 2019.	12
Figura 5 Estimaciones de la contaminación debido a CF en los ríos del mundo. Adaptada de UNESCO 2017 .	13
Figura 6 Estimaciones de la contaminación debido a materia orgánica (DBO) en los ríos del mundo. Adaptada de UNESCO 2017.	14
Figura 7 Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) de México. Tomada de CONAGUA 2018.	15
Figura 8 Volumen concesionado para usos agrupados consuntivos por fuente de extracción, 2017. Tomada de CONAGUA 2018.	15
Figura 9 Impacto anual promedio por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento, desastres relacionados con el agua, epidemias, sismos y conflictos a nivel mundial. Tomada de UNESCO 2019.	17
Figura 10 Es la comparación de la cantidad de flujo de fotones por segundo por centímetro cuadrado, la línea sólida es una muestra tomada a 40 km sobre el nivel medio del mar y la línea punteada es a nivel del mar. 20	
Figura 11 Comparación de la radiación UV-B en las afueras y en el centro de la Ciudad de México, 10 de noviembre de 1994 un día soleado. (Acosta, 2000).	21
Figura 12 Sistema fotocatalítico actual en ICAT.	22
Figura 13 Motor a pasos (103H7121-1311) y válvula de globo de una pulgada.	23
Figura 14 Potenciómetro de 10 vueltas de 10 K Ω	24
Figura 15 Diseño de la base para el sistema de control.	24
Figura 16 Respuesta relativa contra longitud de onda del sensor ML8511, obtenido de la hoja de especificaciones de LAPIS SEMICONDUCTOR.	25
Figura 17 Sensor ML8511.	26
Figura 18 Diagrama de conexión ML8511.	26
Figura 19 Controlador A4988 con disipador de calor para corrientes de trabajo mayores a 1 Amper.	27
Figura 20 Diagrama de conexión del microcontrolador, el controlador A4988 y el motor a pasos.	27
Figura 21 microcontrolador MSP430-G2553.	28
Figura 22 Programa controlador del sistema fotocatalítico primera parte.	30
Figura 23 Programa controlador del sistema fotocatalítico segunda parte.	31
Figura 24 Gráfica del 6 de julio en CDMX, un día parcialmente soleado, las muestras se toman de 10:00 a 18:00.	32
Figura 25 Gráfica del 7 de julio en CDMX, un día parcialmente soleado, con lluvia a las 14:30 horas, las muestras se toman de 10:00 a 18:00.	33
Figura 26 Gráfica del 11 de julio en CDMX, un día nublado, las muestras se toman de 09:00 a 18:00.	33
Figura 27 Gráfica del 13 de julio en CDMX, un día nublado, las muestras se toman de 09:00 a 18:00.	34
Figura 28 Gráfica del 15 de julio en CDMX, un día nublado, las muestras se toman de 09:00 a 18:00.	34
Figura 29 Respuesta del motor en ante una señal de radiación simulada.	35
Figura 30 Señal de radiación UV simulada con un potenciómetro.	35

Tabla 1 Lista de países y la extracción de agua con su uso (CONAGUA, 2018).	12
--	----



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua en México es uno de los grandes problemas que enfrentamos, puesto que tiene consecuencias económicas, sanitarias y sociales. Los malos o nulos tratamientos que se aplican a las aguas residuales, es uno de los factores de la contaminación en los recursos hídricos del país. En las últimas décadas se han encontrado nuevos contaminantes en aguas que han sido tratadas previamente, contaminantes emergentes, los cuales provienen de productos de uso diario y se sabe que año con año su nivel incrementa y que los tratamientos actuales no logran detener su crecimiento.

Entorno actual

La falta de acceso al agua de buena calidad representa en el mundo una de las más grandes causas de pobreza extrema y deterioro de la salud en poblaciones marginadas. La contaminación del agua es un factor de peso importante que evita su tratamiento oportuno, la UNESCO reporta (WATER, 2017) que el 80% del agua utilizada por el ser humano se regresa al ambiente sin tratar; lo cual en países que no tienen los recursos suficientes para llevar a cabo una limpieza adecuada del agua se traduce en problemas de salud para su población.

Existen varios tipos de contaminantes asociados al agua, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, C, 2018) reporta que los principales contaminantes inmersos en ella son: materia orgánica; materia orgánica biodegradable; sólidos y materia orgánica en suspensión y coliformes fecales; los cuales son medidos en las plantas de tratamiento de agua ubicadas a lo largo del país. No solo existen estos contaminantes sino también hay reportes de algunos denominados “contaminantes emergentes”, de los cuales se desconoce o se tiene poca información sobre su origen químico, pero se sabe que causan problemas de salud y que son contaminantes presentes en artículos cotidianos, por ejemplo, los pesticidas, productos farmacéuticos y drogas ilícitas.

Debido a la poca información al respecto de su origen organismos como la OMS (Organización Mundial de la Salud), EPA (*European Environment Agency*) o la Comisión Europea se encuentran investigando dichos contaminantes; debido a los nulos o limitados métodos de análisis muchas veces se omiten en mediciones de calidad del agua tratada (Barceló, 2008).

En México, existen múltiples procesos de tratamiento de aguas, estos se pueden clasificar principalmente en dos grupos: los aerobios, que necesitan de la presencia de aire para llevar a cabo la eliminación de contaminantes orgánicos, entre estos procesos el más importante es el llamado lodos activados; y el de los anaerobios, que no necesitan el aire para poder eliminar contaminantes orgánicos del agua, entre este tipo de procesos destacan los llamados reactores anaerobios (CONAGUA, C, 2018)



INTRODUCCIÓN

Los procesos presentados anteriormente tienen sus ventajas, pues son eficientes, baratos y han demostrado ser capaces de eliminar casi todo tipo de contaminantes orgánicos, sin embargo, uno de los inconvenientes de este tipo de procesos es que últimamente han sido encontrados contaminantes emergentes en aguas tratadas, que son capaces de sobrevivir a los efectos de procesos de lodos activados y, a su vez, han demostrado tener un impacto negativo en la sociedad; pero lo más peligroso acerca de estos contaminantes es la desinformación acerca de su origen y la ignorancia de las autoridades al respecto de éstos, porque aun conociendo los daños que estos producen al medio y a los humanos, no hay leyes que regulen el contenido de contaminantes emergentes en el agua. Esto es debido a que los procesos que se utilizan en más de la mitad de las plantas de tratamiento tienen como base el método de lodos activados.

Los lodos activados consisten en la mezcla del agua prefiltrada con bacterias producto de biomasa suspendida en presencia de oxígeno, que dan como resultado CO_2 y H_2O ; el reactor anaerobio es un proceso que no necesita presencia de aire y da como resultado biogás, CO_2 y sulfuro de hidrógeno. A pesar de que estos tratamientos son comúnmente utilizados, han demostrado su baja efectividad al erradicar contaminantes emergentes. Cifuentes (Cifuentes, 1991) prueba en sus estudios que los campos regados con agua tratada contienen patógenos que provocan afectaciones al ecosistema, así como enfermedades a las personas cercanas a ellos, a diferencia de los lugares donde no se ocupan este tipo de aguas (Cifuentes, 1991).

Para frenar el incremento de los contaminantes emergentes se han investigado nuevos procesos capaces de eliminarlos por completo, entre los que destacan los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) que, debido a su naturaleza, permiten la oxidación de todo tipo de agentes orgánicos presentes en el agua residual por medio de un semiconductor y energía, que juntos producen la mineralización de los contaminantes, CO_2 y H_2O . Los POA surgen como una solución al problema de la baja eficiencia de los tratamientos antes presentados. Existen varios POA, los más importantes son: la fotocatalisis heterogénea, Fenton y Foto-Fenton.

La fotocatalisis heterogénea es un nuevo proceso que presenta grandes ventajas respecto a los sistemas de tratamiento actuales, las más importantes son que eliminan contaminantes emergentes y que sus productos son H_2O , CO_2 (dióxido de carbono) y sales inorgánicas que son generados naturalmente por la mayoría de los seres vivos. En la actualidad la fotocatalisis heterogénea con luz solar no es muy utilizada en procesos industriales o de ingeniería, debido a su baja eficiencia en un sistema de tratamiento, a pesar de ser una de las tecnologías más prometedoras en cuanto a purificación de fluidos.

Descripción del problema a resolver.

En el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) se ha investigado en los últimos años la fotocatalisis heterogénea y a partir de estas investigaciones se ha desarrollado un sistema de captación de agua pluvial que permite la mineralización de contaminantes orgánicos mediante la radiación UV (ultravioleta) y la acción de un catalizador como el TiO_2 (dióxido de titanio). Se utilizaron dos fuentes de radiación, una lámpara UV y la luz solar (Núñez-Flores, 2020). Derivado de las pruebas efectuadas con luz solar se ha detectado que



INTRODUCCIÓN

La intensidad de la radiación solar es un factor importante en la degradación de compuestos orgánicos, por lo que en este trabajo se plantea el diseño de un sistema que regule el flujo de agua en el sistema de purificación de agua en razón del cambio de la incidencia de radiación solar en el sistema. Además, cabe destacar que la medición del flujo volumétrico del sistema actualmente se llevaba a cabo de manera manual, haciendo difícil mantener un flujo constante durante el tiempo que ocurre el proceso.

Objetivo.

Monitorear la radiación ultravioleta para controlar el flujo de agua que circula en un reactor fotocatalítico y así eficientar el proceso de degradación de compuestos orgánicos.

Relevancia y justificación.

El sistema de purificación de agua controlado mediante fotocatálisis heterogénea pretende ser una opción para futuros procesos de tratamiento de agua que permitan el acceso al agua de calidad en lugares con escasos recursos, mejorando así la calidad de vida.

El proceso consta de un sistema de control basado en dos variables de estado (el gasto volumétrico y la radiación ultravioleta) que permiten ingresar agua a un reactor que mineralice por completo los contaminantes.

Alcances y limitaciones.

En el documento se presenta el diseño y selección de los componentes que intervendrán para automatizar el proceso de medición de la radiación solar y el gasto volumétrico para un reactor fotocatalítico, además se propone un algoritmo de control óptimo, en este sentido no se llevarán a cabo pruebas de la integración del sistema.

El proceso presentado está diseñado para poder tratar agua pluvial en un reactor fotocatalítico al aire libre, las limitaciones son varias; como el sensor de radiación UV que se utiliza no es tan preciso como los utilizados en los centros de seguimiento atmosférico, pero es capaz de dar un comportamiento muy similar al que tiene la radiación UV real, esto se muestra al comparar las mediciones de nuestro sensor y las recopiladas de la red Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Otra limitante es el tipo de agua utilizada, pues para poder dar un acercamiento a la degradación de los elementos orgánicos los experimentos fueron llevados a cabo con un contaminante modelo como lo es el ibuprofeno (IBU).

Método

- Se identifican los requerimientos del sistema
- Se realiza una discusión de los componentes que se proponen
- Se plantea la solución integral del sistema
- Se muestra el diseño CAD del sistema
- Se presenta el diseño del algoritmo de control



INTRODUCCIÓN

Resultados esperados

Al realizar pruebas en tiempo real con el sensor ML8511 (vea ANEXO 1: HOJAS DE DATOS DEL SENSOR ML8511) y junto con el sistema electrónico, se espera que estos dispositivos sean capaces de generar una señal de control útil para poder adaptarla como entrada del sistema fotocatalítico y que el motor a pasos (**ANEXO 2: HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL MOTOR 103H7121-XXXX.**) abra o cierre la válvula de globo con base en dicha señal.

Se espera que el sistema presente una respuesta ante la variación de la radiación solar para intensificar el proceso fotocatalítico expuesto en este trabajo, sin embargo, estos resultados pueden ser aplicados en diferentes sistemas que requieran tener un control sobre el flujo con base en la radiación ultravioleta.



ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

Disponibilidad y usos del agua en el mundo

El agua es el recurso natural más valioso de la tierra, pues permite la existencia de la vida como la conocemos hoy día y como tiene tal valor la demanda del mismo es tan grande que ciertos países requieren importar este valioso líquido. Según estudios de la UNESCO (WATER, 2017) la demanda del agua crece 1% cada año y este incremento no se detendrá hasta el año 2050, este crecimiento se debe en gran parte al crecimiento demográfico en muchos países en vías desarrollo, como lo es México, aunque en muchos países desarrollados se necesita más agua para poder satisfacer los servicios de sus habitantes y la creación de los productos que requieren.

En el mundo hay 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua, de los cuales solo el 2.5% es agua dulce; pero la mayoría del agua dulce está contenida en glaciares más del 68% y el 30% es agua subterránea, por lo que las aguas superficiales representan un 0.4% del agua dulce. De las aguas superficiales el agua disponible para consumo es la correspondiente al agua en lagos y ríos, puesto que los demás aspectos están inertes en el ambiente como puede observarse en la figura 1 (Semarnat, 2016).



ANTECEDENTES

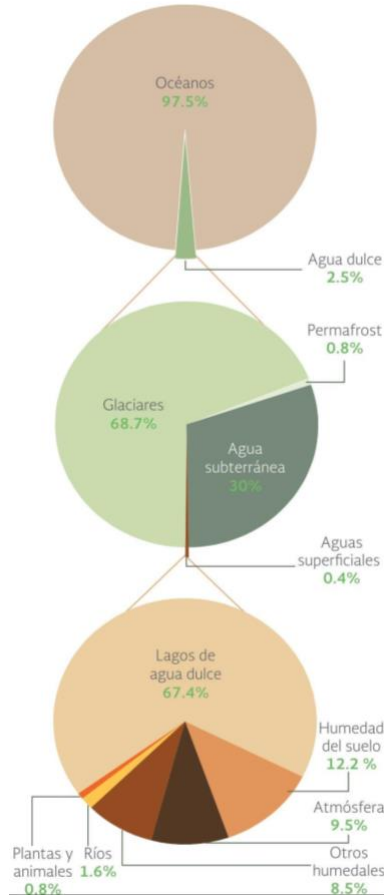


Figura 1 Distribución del agua en el mundo. Tomada de SEMARNAT 2016.

Debido a factores geográficos los países tienen una diferente cantidad de agua superficial disponible, por ejemplo, en la figura 2 se observa el agua superficial disponible en el año 2010.

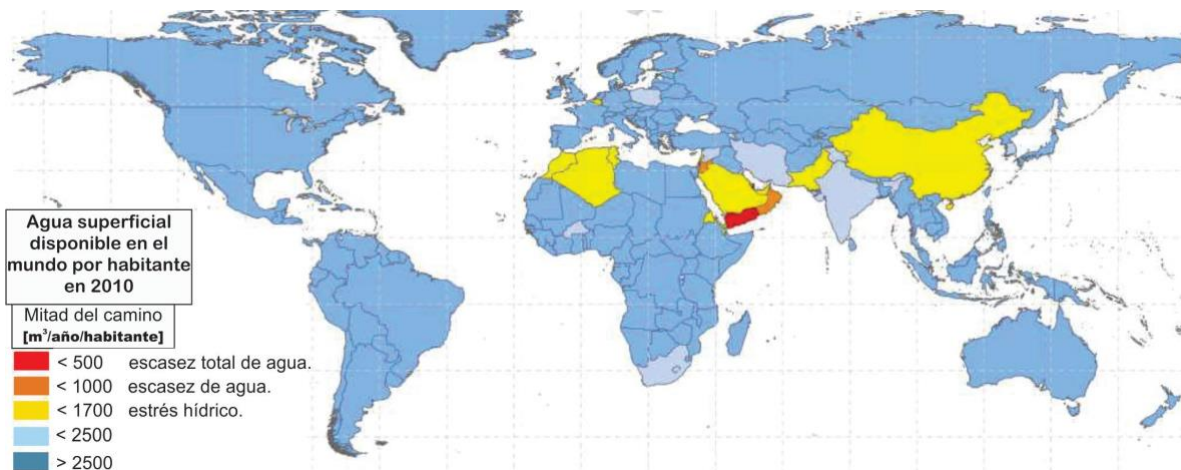


Figura 2 Agua superficial disponible a nivel mundial en 2010. Adaptada de Burek 2016.

En la figura 2 se introducen dos términos, el primero *Mitad del camino*, éste se refiere a que todas las cantidades y cálculos están basadas en el escenario en el que las metas planteadas



ANTECEDENTES

por las organizaciones mundiales no siempre son alcanzadas, así mismo, las condiciones económicas y sociales siguen la tendencia histórica, y no hay un gran cambio en la globalización. El segundo término es estrés hídrico, éste se refiere a que la demanda del agua supera la disponibilidad.

Se prevé que para el 2050 el agua superficial disponible para cada país no se verá afectada de manera notable, pero en la figura 3 podemos observar las tendencias de algunas ciudades que concentran una gran cantidad de población. Un escenario posible para México, a pesar de que será un país sin estrés hídrico al ver las grandes ciudades donde se concentra la mayoría de la población podemos percatarnos que para las ciudades del centro y noroeste del país se prevé una escasez total del agua.

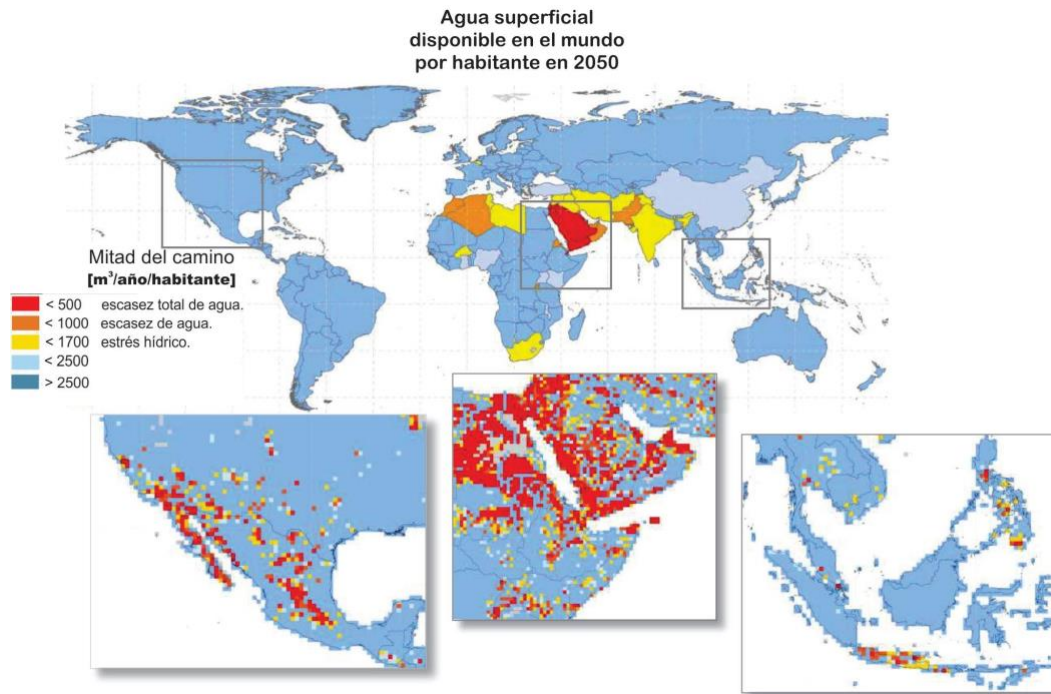


Figura 3 Agua superficial disponible a nivel mundial en 2050. Adaptada de Burek 2016

El uso del agua puede separarse en 5 grandes grupos que nos permiten estudiar más a fondo el comportamiento que tendrá en los próximos años, según datos de la UNESCO los principales grupos son: agricultura, municipal, industrial, generación de energía y producción primaria de energía. El principal uso del agua a nivel mundial es la agricultura (agricultura, ganadería y acuicultura), que destaca por tener el 69% del total del agua extraída, seguido por el uso industrial (incluyendo la generación de energía), que tiene un impacto del 19%, el sector municipal (abastecimiento de agua a hogares) del 12% (WWAP, 2019).

En cuestión de extracción y consumo de agua, la extracción se define como el volumen de agua que es retirado de una fuente y el consumo es el volumen de agua extraído que no se devuelve a la fuente (puede ser por evaporación o se traslada a otra ubicación) y ya no está disponible para otros usos de nivel local. Como puede observarse en la figura 4, el consumo y la extracción a nivel mundial tenderá al alza al menos en los próximos 20 años, siendo el sector agrícola el que más demande del abastecimiento del líquido vital (WWAP, 2019).



ANTECEDENTES

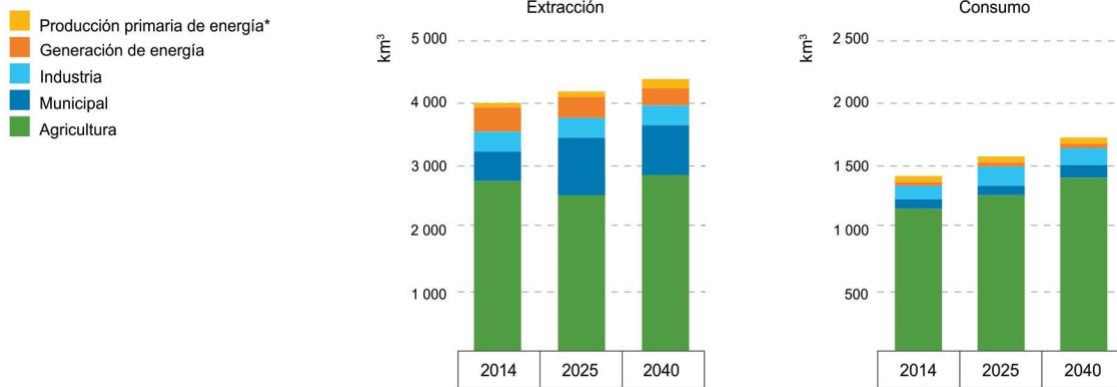


Figura 4 Demanda global de agua por sector. Adaptada de UNESCO 2019.

*La producción primaria de energía contempla producción de materia prima que será convertida en energía.

El uso del agua puede variar dependiendo del país, en tabla 1 se pueden observar los países con mayores extracciones a nivel mundial y el porcentaje que se le destina a cada rubro del total. Se tienen muchos datos acerca del agua extraída en el mundo y de cómo se usa, pero a continuación se habla acerca de cómo es que se desecha.

Tabla 1 Lista de países y la extracción de agua con su uso (CONAGUA, 2018).

No.	País	Extracción total de agua (miles de millones de m ³ /año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
1	India	761.00	90.4	2.2	7.4
2	China	598.10	64.4	22.3	13.3
3	Estados Unidos de América	485.60	36.1	51.2	12.8
4	Pakistán	183.50	94.0	0.8	5.3
5	Indonesia	113.30	81.9	6.5	11.6
6	Irán (República Islámica del)	93.30	92.2	1.2	6.6
7	México	87.84	76.0	9.6	14.4
8	Viet Nam	82.03	94.8	3.7	1.5
9	Filipinas	81.56	82.2	10.1	7.6
10	Japón	81.45	66.8	14.3	18.9
11	Egipto	78.00	85.9	2.6	11.5
12	Brasil	74.83	60.0	17.0	23.0
13	Iraq	66.00	78.8	14.7	6.5
14	Federación de Rusia	61.00	19.9	59.8	20.2
15	Tailandia	57.31	90.4	4.8	4.8
16	Uzbekistán	56.00	90.0	2.7	7.3
17	Italia	53.75	44.1	35.9	17.6
18	Turquía	42.01	80.9	10.7	15.5
19	Canadá	38.80	12.2	80.2	14.2
20	Argentina	37.78	73.9	10.6	15.5

El ciclo ideal del agua en la sociedad actual es que después de cumplir su propósito se pueda reutilizar o verter, después de un proceso que asegure niveles de contaminación aceptables, en cuerpos de agua; pero la realidad es otra, según estudios de la UNESCO (WATER, 2017) se estima que alrededor del 80% del agua utilizada en el mundo se tira sin ningún tipo de



ANTECEDENTES

tratamiento al medio ambiente. Lo anterior, sumado a los datos presentados por la OMS (World Health Organization, 2002) acerca del incremento del uso de agua residuales para la agricultura, nos advierte que muchos de los campos de riego del mundo utilizan agua tratada levemente o simplemente sin tratamiento alguno.

Dentro de los contaminantes más comunes del agua residual podemos encontrar los siguientes: la materia orgánica; la materia orgánica biodegradable; sólidos y materia orgánica en suspensión y coliformes fecales. La UNESCO reporta la contaminación de agua superficial debido a los contaminantes coliformes fecales (CF) (véase figura 5), así como la existencia de materia orgánica biodegradable, medida con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (véase figura 6).

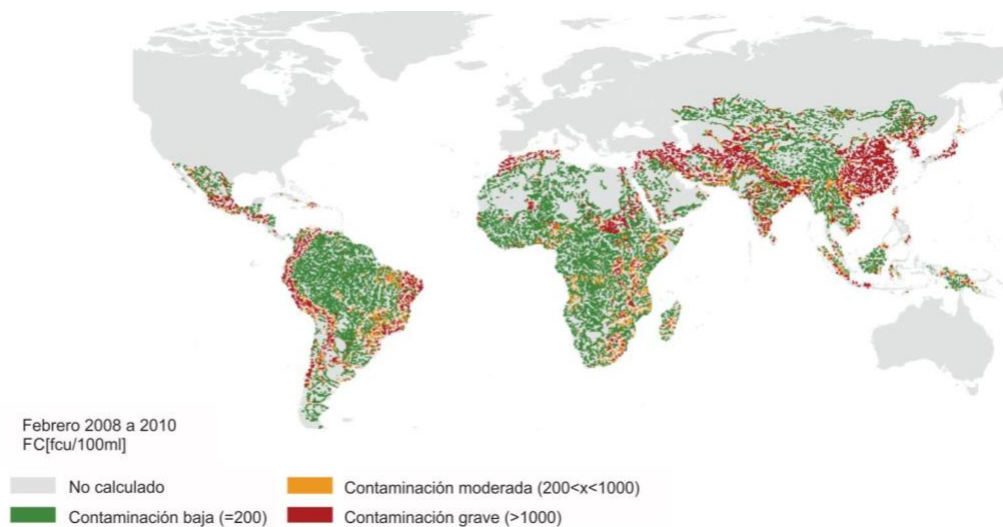


Figura 5 Estimaciones de la contaminación debido a CF en los ríos del mundo. Adaptada de UNESCO 2017

En la figura 5 se observan los grados de contaminación de agua debido a los contaminantes CF, según la OMS cuando la contaminación se encuentra en un nivel bajo es apta para el contacto primario, en el nivel moderado el agua es apta para el riego y cuando la contaminación es grave es porque supera los umbrales, cabe destacar que estos parámetros son estandarizados para Alemania (WATER, 2017). Estos datos nos hablan sobre el escaso tratamiento que se le da al agua residual en muchos lugares, entre los cuales destacan los países en desarrollo como México y Brasil, pero también potencias como China e India.

Hay otros indicadores como la DBO que indica la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en aguas superficiales, este tipo de contaminante se debe a la descarga de aguas municipales, esto quiere decir que su presencia es provocada por el mal o nulo tratamiento que se da al agua antes de derramarla en un cuerpo de agua superficial. En la figura 6 se encuentra la DBO medida en los ríos del mundo.



ANTECEDENTES

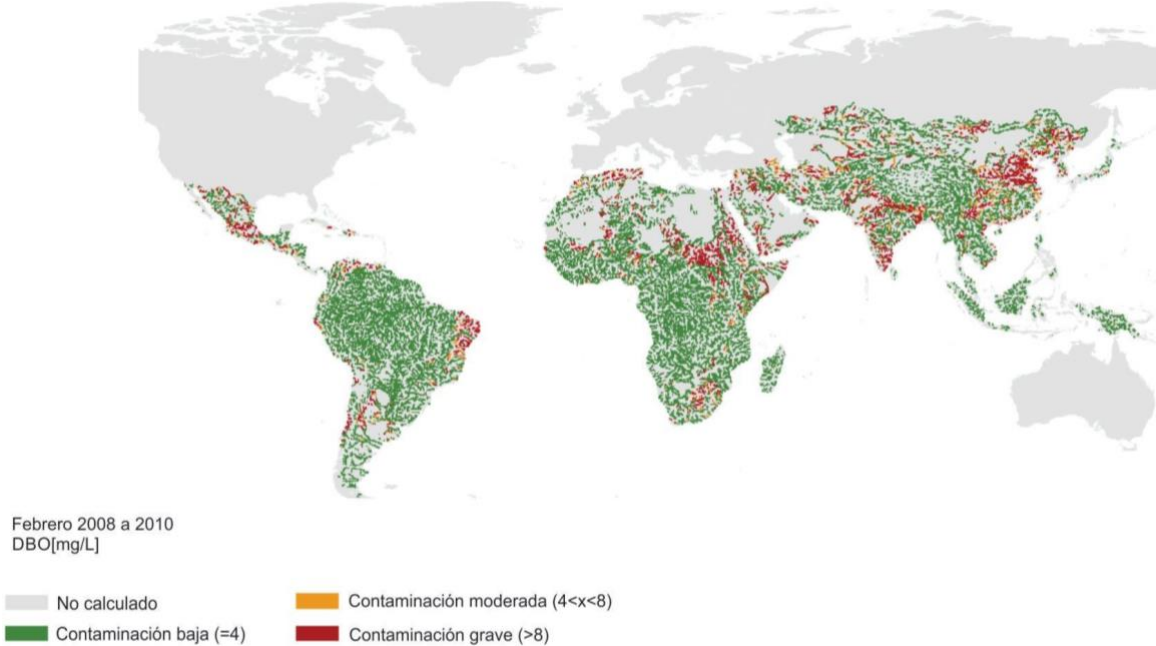


Figura 6 Estimaciones de la contaminación debido a materia orgánica (DBO) en los ríos del mundo. Adaptada de UNESCO 2017.

Disponibilidad y problemas de contaminación de agua en México.

Para mantener un control sobre el agua en México el país se divide en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), las cuales se muestran en la figura 7, dicha imagen resalta otra división del país, la zona sureste y las demás zonas, en el sector sureste está alrededor del 67% del agua renovable¹ del país, pero el 77% de la población total está en los sectores restantes (norte, centro y noroeste) y además sólo el 17% del Producto Interno Bruto (PIB) está ubicado en el sureste. El problema del agua en México se concentra en estos tres sectores, puesto que para mantener el nivel de vida que tiene esta zona muchas veces el agua es sobreexplotada. Por ejemplo, en la Ciudad de México el promedio de agua renovable por habitante por año es de 55 m³ de agua renovable por año, mientras que su contribución al PIB nacional fue casi de 17% en 2016, por otro lado Chiapas es un estado con 21,199 m³ de agua renovable por habitante por año, pero su aportación al PIB en ese mismo periodo fue del 1.7% (CONAGUA, C, 2018).

¹ Cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en una región, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y el agua proveniente de otras regiones o países (importaciones). Se calcula como el escurrimiento natural medio superficial interno anual, más la recarga total anual de los acuíferos, más los flujos de entrada menos los flujos de salida de agua a otras regiones (CONAGUA, 2018).



ANTECEDENTES



Figura 7 Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) de México. Tomada de CONAGUA 2018.

En México la cantidad de agua que se extrae es de 87.84 miles de hm^3 al año, de esta cantidad el 76% se destina al uso agrícola (véase tabla 1), el 9.6% se destina al sector industrial y el 14.4% se destina al uso municipal. Esto representa las extracciones del año 2017 reportadas por la CONAGUA (CONAGUA, C, 2018)

De la cantidad total extraída el 60.9% corresponde a agua superficial y lo demás viene del agua subterránea. Con base en los datos anteriores se puede inferir que gran parte del agua superficial debe ser utilizada para la agricultura, como lo reafirma la CONAGUA reportando los usos del agua según la fuente de la que fue extraída, como se ve en la figura 8.

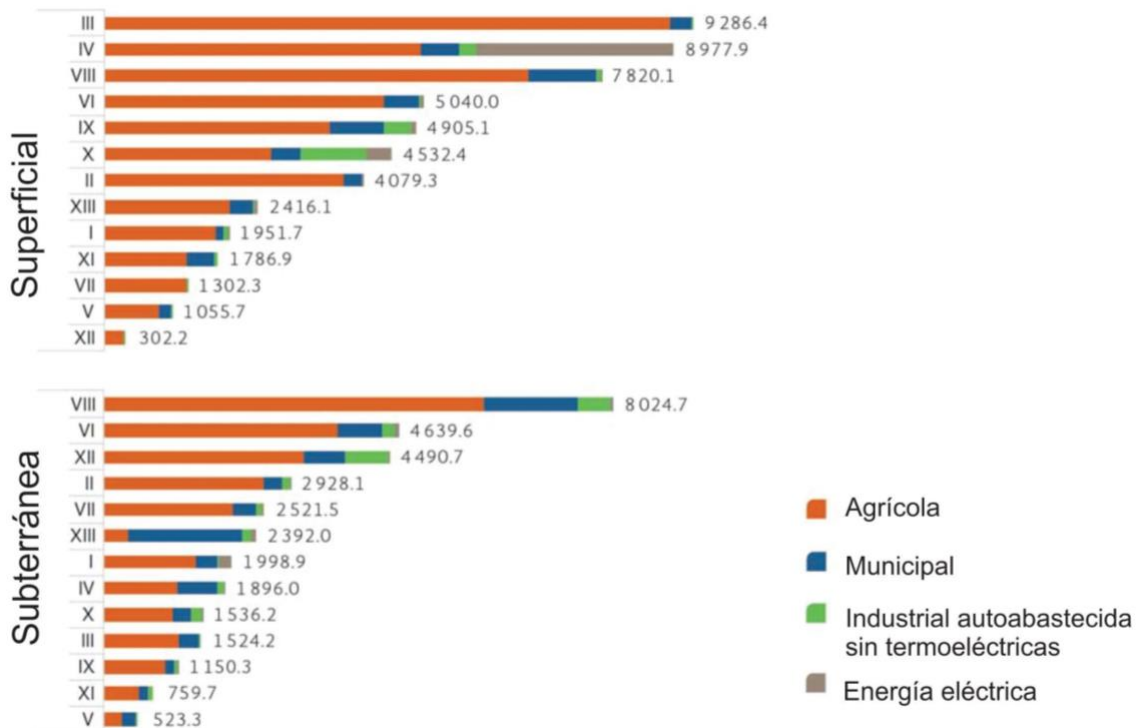


Figura 8 Volumen concesionado para usos agrupados consuntivos por fuente de extracción, 2017. Tomada de CONAGUA 2018.

La CONAGUA vigila la calidad del agua en el territorio mexicano, para lo cual se basa en 3 indicadores principales, los contaminantes CF, la materia orgánica biodegradable y la materia



ANTECEDENTES

orgánica no biodegradable. Como se explicó anteriormente la materia CF se mide en aguas superficiales, así mismo se utiliza una prueba DBO, para poder determinar la cantidad de materia orgánica biodegradable y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para saber la cantidad de materia orgánica no biodegradable, ésta tiene su origen en las aguas residuales en general.

Contaminantes emergentes.

En la vida diaria utilizamos todo tipo de productos para cuidado personal o para el aseo de la casa y muy pocas veces nos preguntamos acerca de cómo es que un medicamento, un protector solar, un limpiador de pisos, un desinfectante, un jabón o un desodorante pueden contaminar. La verdad es que estos productos casi siempre contienen nanomateriales creados para limpiar y mantener nuestro ambiente libre de bacterias o contaminantes, pero debido a esto los nanomateriales empleados no son biodegradables a corto plazo, es decir su proceso puede durar décadas o siglos. Las aguas tratadas actualmente contienen un gran número de contaminantes emergentes y en los países desarrollados este número es alarmante, pues se espera que la cantidad de estos contaminantes siga creciendo (Manahan, 2010).

Sistemas de tratamiento de agua

Existen tres grandes divisiones cuando se habla del tratamiento de agua y dependiendo del uso que se le dará al agua será el tratamiento que recibirá; no es la misma calidad requerida para un uso industrial que la de uso municipal. Las tres divisiones son: Tratamiento de aguas industriales, tratamiento para aguas municipales y tratamiento de aguas residuales (Manahan, 2010).

Las aguas industriales son tratadas de distinta manera del agua municipal porque a diferencia del agua pública el agua industrial trabajará en máquinas o para producir alimentos, por eso dentro de los tratamientos industriales existen distintos tipos de los mismos, dependiendo del uso que se le dé al agua.

Las aguas municipales deben de ser seguras para el contacto con el ser humano, es decir se debe de asegurar que se eliminen patógenos y bacterias para tener este tipo de agua, estas aguas principalmente son tratadas con 3 procesos, un primer filtro para remover desperdicios insolubles en agua, después se mete el agua a un tanque de lodos activados y por último un proceso de cloración para poder brindar la calidad que requiere el agua municipal (Manahan, 2010).

Los tratamientos de aguas residuales, estas aguas vienen del mismo lugar que las aguas municipales, pero a diferencia de ellas, no se recirculan al agua potable. El proceso de aguas residuales consta de tres pasos, primero la filtración de elementos sólidos suspendidos o que no se disuelvan en el agua, como aceites y grasas, el segundo paso consta de una desinfección de productos biológicos, en este paso se estima que el proceso más utilizado es el de lodos activados, que consta de hacer que las bacterias se alimenten de los desechos orgánicos. El último paso se encargará de reducir al máximo los niveles de contaminación que se hayan



ANTECEDENTES

omitido en los pasos anteriores. Cabe mencionar que los contaminantes que representan un gran reto para este tratamiento son bacterias, virus y algunos medicamentos que sigan dentro del agua, es por eso que beber agua residual o tratada, como también se le conoce, es muy peligroso pues tiene varias bacterias dentro y podemos enfermarnos (Manahan, 2010).

La UNESCO reporta que los tratamientos que se le dan al agua en el mundo no son eficientes, comparando con otros desastres naturales o guerras, las muertes causadas por enfermedades debidas al mal tratamiento del agua (diarrea y cólera) son mayores, como se puede ver en la figura 9. Este dato es alarmante debido a que nos encontramos en pleno siglo XXI y parece que los esfuerzos de los países en desarrollo no son suficientes para mitigar este mal.

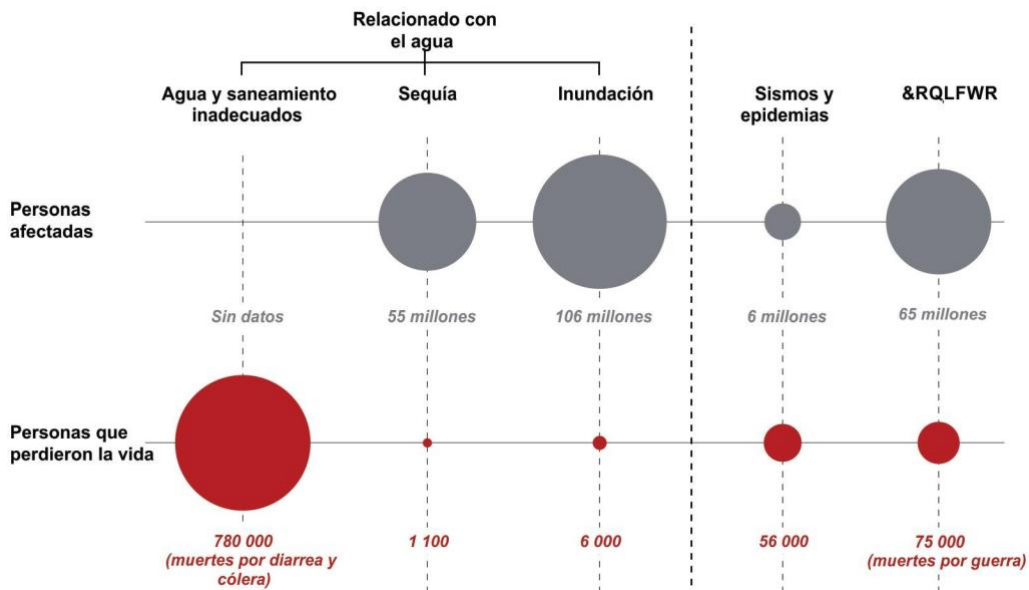


Figura 9 Impacto anual promedio por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento, desastres relacionados con el agua, epidemias, sismos y conflictos a nivel mundial. Tomada de UNESCO 2019.

Como lo señala la OMS (Organization, 2006) el agua tratada al ser reutilizada en el riego tiene potencial tanto positivo como negativo para el ambiente, todo dependerá de la planeación y la administración de los recursos con los que se trata el agua, así como de incorporar nuevos sistemas de tratamiento que permitan filtrar los materiales dañinos y dejar elementos que sirvan como fertilizante para los cultivos, haciendo más seguro y asequible para las personas trabajar o dedicarse a la agricultura.

Procesos de Oxidación Avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son procesos de descontaminación que consisten en la generación de agentes altamente oxidantes, para poder degradar las moléculas contaminantes hasta mineralizarse. Los POA son separados en dos grandes grupos, los fotoquímicos y los no fotoquímicos, como su nombre lo indica la diferencia entre ambos es que uno requiere la presencia de luz para llevar a cabo la reacción y el otro grupo no. Cabe destacar que muchos de los POA se basan en la generación del radical hidroxilo, ya que es una de las especies oxidantes más reactivas (Amenta, 2018).



ANTECEDENTES

Los principales POA no fotoquímicos son: electrólisis (Corriente y electrodos), sonólisis (Ultrasonido), Ozono(O₃) y fenton (Fe²⁺+H₂O₂). Los principales POA fotoquímicos son: fotocatalisis (luz + catalizador), foto-fenton (luz solar + fenton) y fotólisis (UV + H₂O₂). La mayor ventaja de todos estos procesos frente a otros procesos de tratamiento es que son amigables con el ambiente, pues los productos de sus reacciones son sales inorgánicas, H₂O y CO₂.

Hoy en día los POA son una opción para aquellos sistemas de tratamiento convencionales, que hasta ahora han demostrado ser útiles para remover elementos no deseados en el agua, por otro lado, su efectividad está siendo rebasada por el crecimiento de nuevos contaminantes llamados recalcitrantes o emergentes, pues la concentración de éstos en aguas tratadas se muestra al alza desde que se detectaron.

Uno de los principales inconvenientes para los POA son sus elevados costos debido a la energía aplicada o el alto precio de la materia prima (Vázquez J. C., 2003). A pesar de esto, las ventajas parecen ser cada vez mayores, pues aunado al hecho de ser amigables con el ambiente, algunos POA no requieren de energía externa, además que bajan la toxicidad y mineralizan los contaminantes orgánicos en aguas residuales (Amenta, 2018).

Fotocatalisis heterogénea

La fotocatalisis necesita de dos componentes importantes un catalizador (semiconductor) y un reactivo (agua o aire). En el semiconductor se lleva a cabo la separación del par electrón-hueco ($e^- - h^+$) debido a la excitación de los electrones en la banda de valencia en presencia de luz y el tipo de luz dependerá del catalizador que sea utilizado. Las especies ($e^- - h^+$) migran a la superficie del catalizador para reaccionar con los reactivos y así generar radicales hidroxilos, formados a través varias reacciones, los cuales desintegran a los contaminantes y generan CO₂, H₂O y sales inorgánicas. La fotocatalisis se divide en dos categorías, homogénea (cuando el reactivo y el catalizador están en la misma fase) y heterogénea (cuando el reactivo y el catalizador están en diferentes fases) (Manahan, 2010).

La fotocatalisis heterogénea tiene muchas aplicaciones, pero una de las más importantes y prometedoras es el tratamiento de aguas residuales para la mineralización de contaminantes recalcitrantes. El TiO₂ es un semiconductor ampliamente utilizado en este tipo de procesos, puesto que ha demostrado ser muy eficiente comparado con otros semiconductores y es capaz de eliminar hasta un 70% de contaminantes emergentes en 3 horas (Flores, 2021). El TiO₂ es abundante en la corteza terrestre y debido a su nula toxicidad es utilizado en la industria para productos de consumo personal (Nakata, 2012); a su vez los estudios demuestran que es un material capaz de mineralizar contaminantes en aguas residuales, cabe destacar que este material tiene un gran potencial debido a su bajo costo y su alta eficiencia.

Cuando el semiconductor y el reactivo están en un proceso fotocatalítico requieren energía para que sus electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción, en el caso



ANTECEDENTES

del TiO₂ degussa P25, la energía que requiere un electrón es de 3.2 eV en promedio, lo cual significa que la longitud de onda que hace reaccionar este material es de 387 nm, como se menciona más adelante esta longitud de onda se encuentra en el rango de la luz ultravioleta (Amenta, 2018).

En estudios recientes se ha demostrado que la eficiencia de la fotocatalisis heterogénea aumenta en presencia de un mezclador estático, este fenómeno ha sido estudiado en el ICAT y además se encontró que el caudal adecuado para lograr la mayor degradación en el sistema fotocatalítico y es de 0.15 L/min (Núñez-Flores, 2020).

Radiación ultravioleta (UV)

En el espectro electromagnético podemos distinguir a la radiación ultravioleta, cuya longitud de onda (λ) es menor que la del espectro visible, la longitud de onda de la radiación UV abarca desde 100 hasta 400 nm. Su descubrimiento fue gracias a los experimentos de Johann Wilhem Ritter (1776-1810), ya que en 1803 al experimentar con el cloruro de plata (AgCl) descubrió que fuera del espectro visible dicho compuesto reaccionaba con mayor rapidez comparada con la luz en cualquier otra zona de dicho espectro, entonces a la luz ubicada en esa zona después del violeta se le conoció como “rayos químicos” (Vázquez M. &., 2005), pero después se rebautizaron como rayos “ultravioleta”, del Latín “ultra” que significa más allá.

La fuente natural de radiación más grande para nosotros es el Sol, esta estrella es capaz de producir el espectro electromagnético desde 1 hasta 10⁶ nm, gracias a los procesos nucleares que se llevan a cabo en él. Como se describió anteriormente el espectro UV se encuentra entre 100 y 400 nm, pero a su vez éste es clasificado en 3 grandes grupos según su λ , radiación UV A (400-315 nm), UV B (315-280 nm) y UV C (280-100 nm) (Vázquez J. C., 2003).

La atmósfera terrestre juega un papel fundamental en la vida de la Tierra, puesto que es un filtro natural para la mayoría de la radiación dañina proveniente del espacio, según la guía “ÍNDICE UV SOLAR MUNDIAL” (World Health Organization, 2002) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la atmósfera es capaz de filtrar por completo la radiación UV C y el 90% de la radiación UV B, a su vez informan que cada 300 m que nos elevemos respecto al nivel medio del mar hay 4% más de radiación UV, para la Ciudad de México (CDMX) esto se debería traducir hasta alrededor de un 30% más de radiación UV, pues la altura media de la CDMX es de 2,250 m sobre el nivel del mar. En la figura 10 se observa la comparación entre mediciones de radiación a dos alturas diferentes, una a 40 km sobre el nivel del mar y otra a nivel del mar, lo cual puede confirmar lo dicho por la OMS.

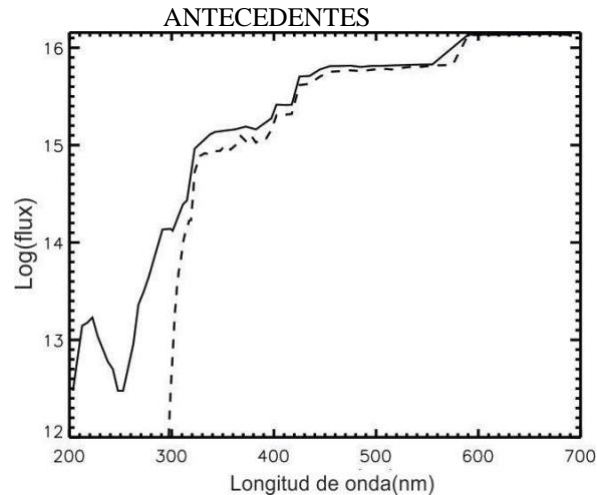


Figura 10 Es la comparación de la cantidad de flujo de fotones por segundo por centímetro cuadrado, la línea sólida es una muestra tomada a 40 km sobre el nivel medio del mar y la línea punteada es a nivel del mar.

La radiación UV puede ser detectada de distintas maneras, las cuales emplean gases o semiconductores que reaccionan en presencia de la radiación con la longitud de onda del espectro UV. Los gases se ionizan en presencia de la longitud de onda adecuada, en cambio los fotodiodos son construidos de un semiconductor, en su mayoría silicio que es capaz de producir una corriente en presencia de la radiación (Skoog, 2008).

Los transductores de fotodiodos son dispositivos que suelen ser empleados para la detección del espectro electromagnético, no necesitan grandes cantidades de energía y pueden ser alimentados por baterías pequeñas, por lo que son dispositivos relativamente baratos y accesibles para proyectos que no demanden tanta precisión como aquella que se logrará con un transductor que trabaja con gas (Skoog, 2008).

Para poder expresar la cantidad de radiación ultravioleta existen varias unidades de medida. La primera es la potencia radiante, representada por P o Φ (también conocida como Flux) equivalente a J/s o W . La segunda cantidad es la irradiancia, representada por E y se define como la potencia radiante por unidad de área y su unidad es W/cm^2 . La tercera es la exposición radiante H , que es equivalente a la energía radiante por unidad de área, su unidad es J/cm^2 (Ghetti, 2006), otra unidad relacionada con la exposición radiante son los MED (Dosis Mínima Eritémica), es decir la cantidad de energía radiante requerida para causar enrojecimiento (eritema) en la piel. Cabe destacar que la piel humana es distinta, se puede clasificar en varios tipos dependiendo el color y se requiere de una cantidad diferente para causar un eritema en cada tipo de piel. Por lo regular se utiliza MED/h para medir la radiación UV-B, debido a que se relaciona directamente con el daño que puede producir una exposición prolongada a la radiación UV-B.

Radiación solar en Ciudad de México.

Pese a que los datos presentados en la figura 10 sugieren que la radiación en la Ciudad de México (CDMX) debe ser mayor que a nivel del mar, existen factores que influyen en la



ANTECEDENTES

minimización de la radiación en la CDMX, el más importante es la contaminación por ozono en el área metropolitana. Acosta (Acosta, 2000) reporta que la capa de smog que envuelve la ciudad es capaz de mitigar la radiación UV-B, tal y como se muestra en la figura 11.

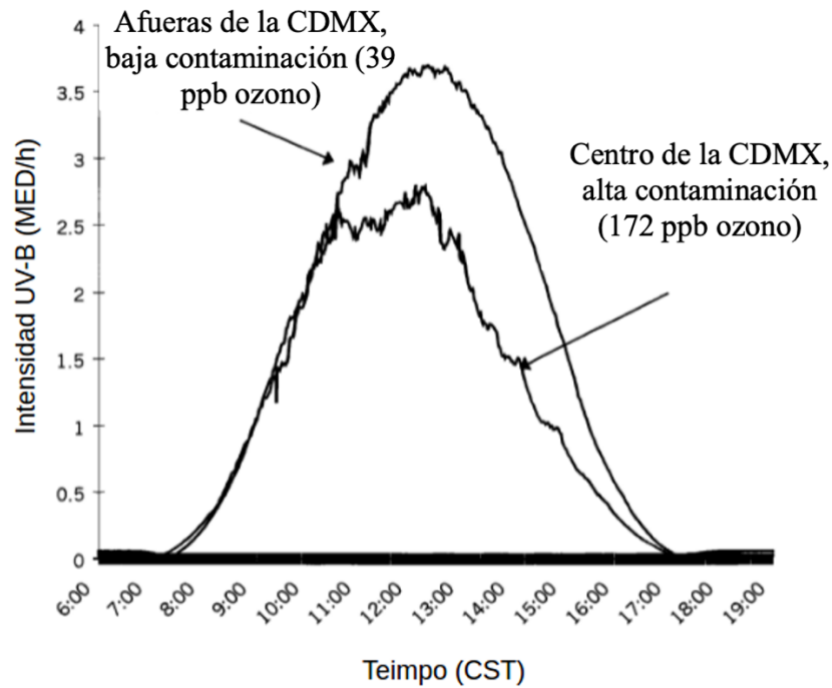


Figura 11 Comparación de la radiación UV-B en las afueras y en el centro de la Ciudad de México, 10 de noviembre de 1994 un día soleado. (Acosta, 2000).



METODOLOGÍA

Como se mencionó, en el ICAT se desarrolló un sistema de purificación de agua pluvial, dicho sistema se basa en la fotocatalisis heterogénea con TIO_2 como catalizador y utiliza luz solar para llevar a cabo la mineralización de un contaminante modelo como lo es el ibuprofeno (IBU). Este sistema se muestra en la figura 12; se instaló en el techo del ICAT y con este sistema se realizaron pruebas de degradación del IBU, a pesar de tener resultados satisfactorios dicho sistema regula el flujo de agua de manera manual, por lo que se planteó un sistema de control que permita mantener un flujo volumétrico óptimo en razón del cambio de la radiación UV solar.

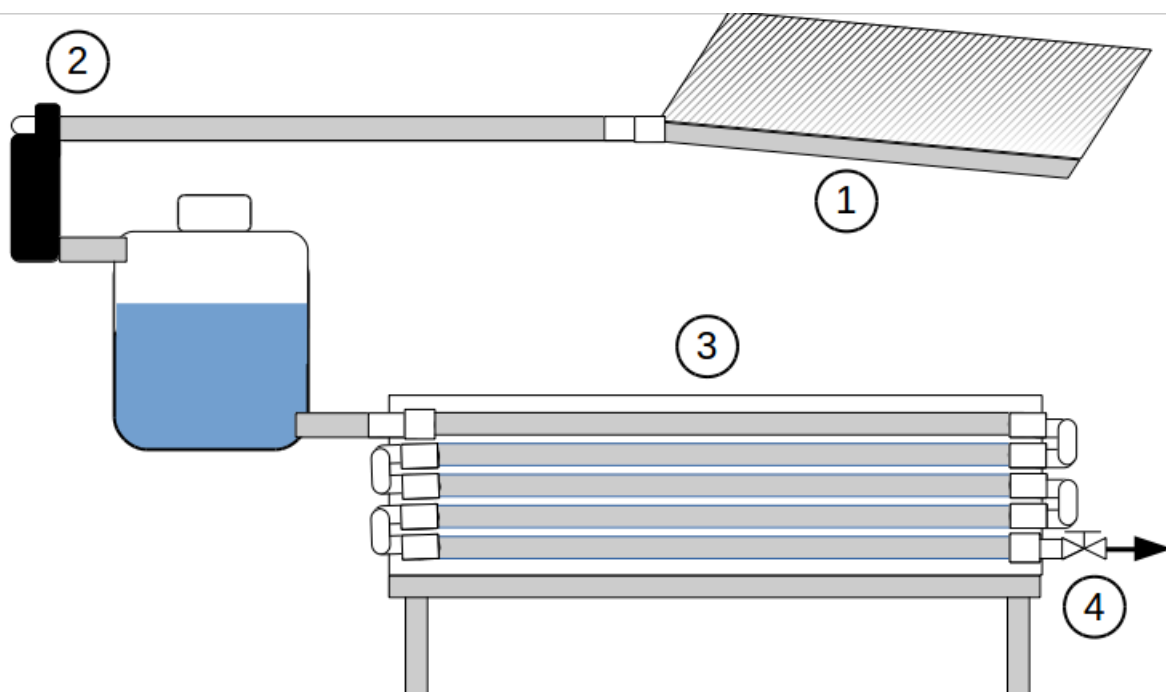


Figura 12 Sistema fotocatalítico actual en ICAT.

El proceso que se muestra comienza en 1 con un captador de lluvia, después el agua circula a 2, que consta de un proceso de filtrado de contaminantes de gran tamaño, como hojas o ramas que puedan quedar atrapadas durante la captación del agua; terminado el filtrado se introduce a un contenedor de agua que nos ayudará a mantener hasta 1000 L de agua prefiltrada, para después introducir este líquido al sistema fotocatalítico 3, el cual consiste de tubos de borosilicato transparente conectados entre sí con codos a 90° instalados sobre la estructura del reactor fabricado de acero inoxidable, para concentrar la radiación UV, el reactor cuenta con aluminio altamente reflejante con forma de doble parábola para cada tubo, en 4 se muestra el sistema de control actual, el cual únicamente consiste en una válvula de globo y se acciona manualmente para regular el flujo volumétrico en el sistema.



METODOLOGÍA

Especificaciones del sistema

El sistema de control de flujo mediante radiación solar se encargará de que el caudal tenga un valor que optimice la degradación de los contaminantes durante el proceso, según estudios anteriores realizados en este sistema (Núñez-Flores, 2020), el caudal óptimo en presencia de lámparas UV es de 0.15 litros por minuto. El sistema presentado trabajará con la radiación solar, a diferencia de la radiación por lámparas, la radiación UV será variable y como se mencionó anteriormente, hay otros factores que influyen en ella.

En la figura 11 podemos notar que la contaminación en la CDMX es un factor importante cuando se trabaja con radiación ultravioleta, esto remarca la importancia de la optimización de un proceso fotocatalítico en función de la radiación solar instantánea. El sistema presentado deberá ser capaz de responder a un cambio en la radiación UV, aumentando o disminuyendo el caudal, es por esto que se requiere un sensor de radiación ultravioleta y un sistema de hidráulico accionado por una electroválvula diseñada a partir de un motor a pasos y una válvula de globo.

Se tomará como referencia el valor de caudal de 0.15 litros por minuto como el valor óptimo y deberá reducirse o incrementarse cuando lo haga la radiación; pero para regular el caudal con una válvula de globo se debe tener en cuenta la resolución que ofrece nuestro actuador (motor a pasos).

Sistema Mecánico

Para este sistema se propone una electroválvula que regule el flujo volumétrico de 0.15 litros por minuto y que tenga un diámetro de entrada de 32 mm. Para poder realizar esta tarea se adaptó una válvula de compuerta que es accionada por un motor a pasos (103H7121-1311), que tiene una resolución de 1.8° por paso, un torque de 0.98 Nm a 24 V con eje extendido, con esto puede abrir y cerrar la válvula cuando está conectada al sistema fotocatalítico.

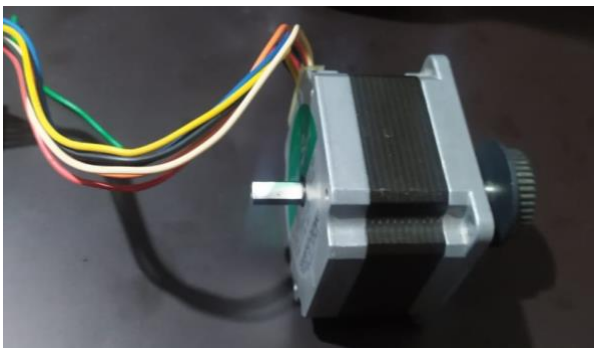


Figura 13 Motor a pasos (103H7121-1311) y válvula de globo de una pulgada.



METODOLOGÍA

Para medir caudales similares a la magnitud antes mencionada se requiere un equipo sofisticado que nos brinde estas lecturas y que además no interfiera de ninguna manera con el fluido, pues puede afectar el proceso fotocatalítico; es por esto que se propuso el uso de una electroválvula, debido a que los caudalímetros indicados para este tipo de procesos son demasiado costosos y su uso es poco viable en un proyecto de dimensiones industriales.

Para tener un dato certero acerca del flujo de agua en el sistema se requiere de una curva de calibración del sistema mecánico (caudal vs posición de la válvula), partiendo siempre de una válvula completamente cerrada se puede realizar una gráfica con el número de pasos que da el motor y el flujo que presenta la válvula en ese momento, sin embargo, esta curva presenta un problema; se debe saber cuándo la válvula se encuentra cerrada completamente. Para resolver este problema se cuenta con un potenciómetro de 10 vueltas, mostrado en la figura 14, conectado a la flecha del motor a pasos, con este potenciómetro se puede conocer la posición de apertura y cierre de la válvula, además es posible calibrar el caudal debido a los pasos del motor y la apertura de la válvula (caudal vs voltaje del potenciómetro) que nos permitirá saber exactamente la posición de la válvula y el flujo volumétrico simplemente con el voltaje del potenciómetro.



Figura 14 Potenciómetro de 10 vueltas de 10 K Ω .

Estructuras

El montaje de los elementos mecánicos se llevó a cabo en una placa de aluminio para poder acoplar este sistema mecánico al reactor fotocatalítico. Como puede observarse en el diseño de la figura 15, el motor y la válvula están conectados mediante un cople de latón y el motor está sujeto a la base mediante dos estructuras tipo escuadra, también se diseñó una base de aluminio para mantener centrado el eje del motor con el eje del potenciómetro.

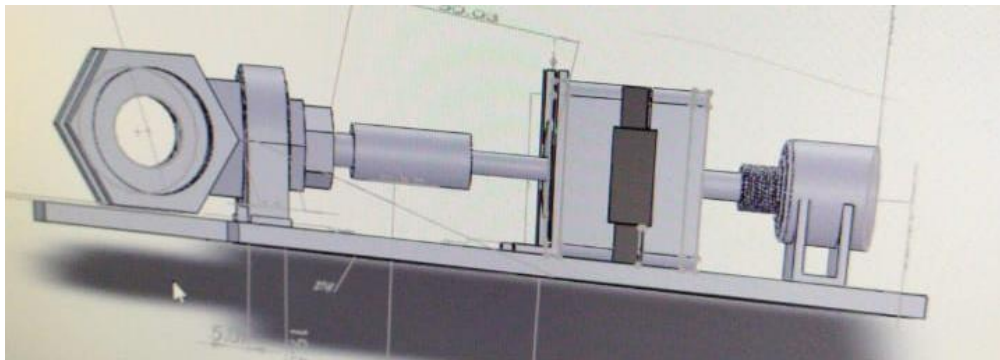


Figura 15 Diseño de la base para el sistema de control.



METODOLOGÍA

Sistema electrónico

El sistema electrónico se enfoca en dos secciones, la primera es el control del motor a pasos (Puente H), la segunda es el sensor de radiación UV (ML8511). El Puente H y el sensor a su vez están conectados a un microcontrolador MSP430 de Texas Instruments, que se encargará de leer las variables de control (radiación UV y voltaje del potenciómetro), además de mandar la señal de control al motor a pasos, para la apertura o cierre de la válvula.

Se cuenta con un motor a pasos que requiere 24 volts para su funcionamiento, en este sentido se propone al A4988 para la etapa de potencia del motor a pasos, este controlador nos permite cambiar el sentido de giro del motor, así como mantener los pasos correspondientes del motor, por lo que este puente H es ideal pues el voltaje de trabajo se encuentra entre 8 y 35 volts.

El sensor de radiación UV elegido para el sistema es el ML8511, este sensor trabaja con un fotodiodo, en la hoja de especificaciones se observa que este sensor presenta sensibilidad al espectro UV correspondiente al UV-A (400 - 315 nm) y al UV-B (315 - 280 nm), como se puede observar en la figura 16.

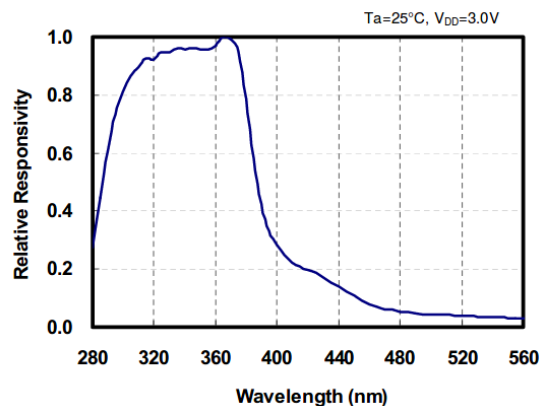


Figura 16 Respuesta relativa contra longitud de onda del sensor ML8511, obtenido de la hoja de especificaciones de LAPIS SEMICONDUCTOR.

Sensor de radiación ultravioleta.

El sensor ML8511 cuenta con 4 pines (como puede observarse en la figura 17), el Enable (Habilitación), Out (Voltaje de salida), GND (Tierra) y 3.3 (Voltaje de alimentación, 3.3 volts). Todas sus salidas serán conectadas como lo muestra la figura 18. Es importante mencionar que el voltaje de salida es una variable analógica que varía entre 0 y 3.3 volts y depende de la radiación UV incidente en el momento de la lectura.



METODOLOGÍA

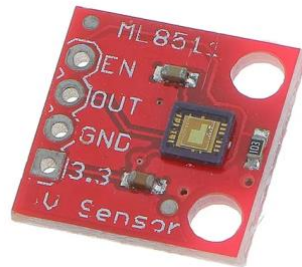


Figura 17 Sensor ML8511.

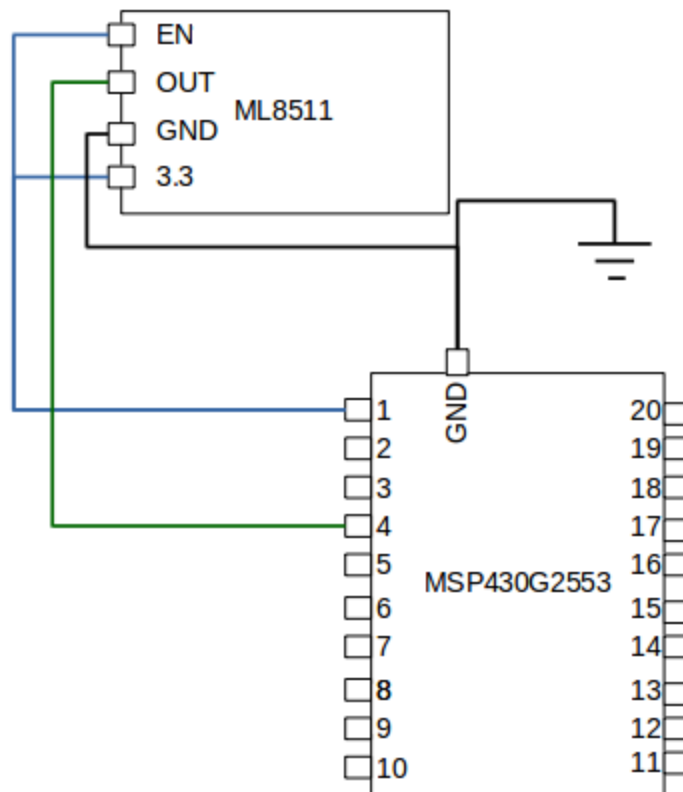


Figura 18 Diagrama de conexión ML8511

Controlador de motor paso a paso.

El controlador A4988 (figura 19) es un puente H que permite controlar motores a pasos bipolares, en la (figura 20) se muestra la conexión de dicho controlador y la conexión con el motor a pasos y el microcontrolador.



METODOLOGÍA

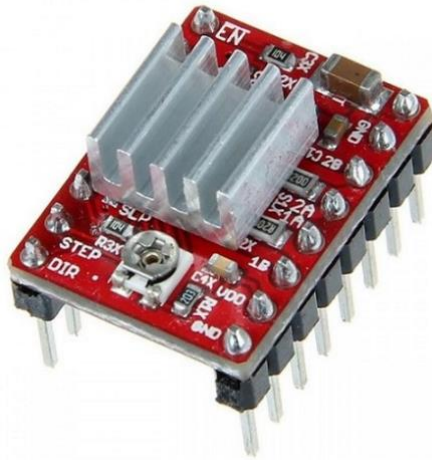


Figura 19 Controlador A4988 con disipador de calor para corrientes de trabajo mayores a 1 Amper.

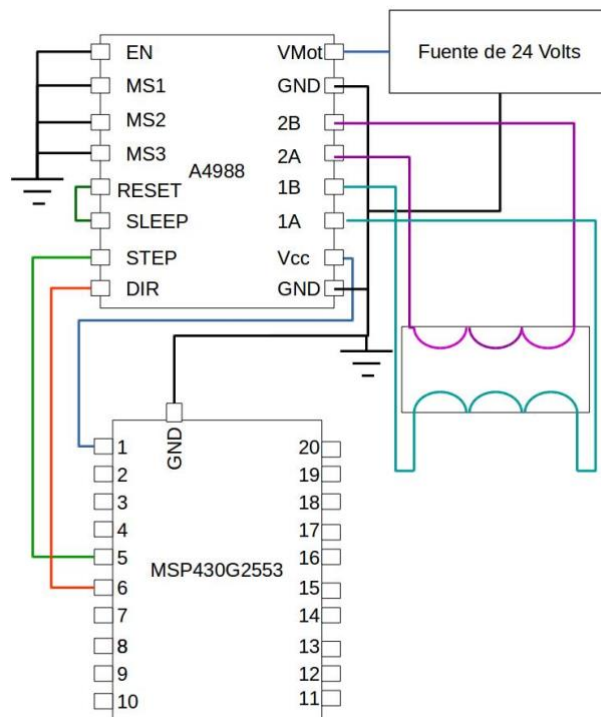


Figura 20 Diagrama de conexión del microcontrolador, el controlador A4988 y el motor a pasos.

El controlador A4988 se conecta de manera muy sencilla y solamente requiere de dos entradas, la dirección de giro y un pulso para dar un paso, de esta manera podremos mantener el flujo constante de una manera más precisa.



METODOLOGÍA

Microcontrolador

Para poder controlar al sistema se utilizó un microcontrolador MSP430-G2553 de Texas Instruments, esta tarjeta puede recibir la lectura del sensor ML8511 cada minuto o menos y con base en este valor y la programación controlar el motor a pasos, tanto el giro como el número de pasos para regular el flujo.

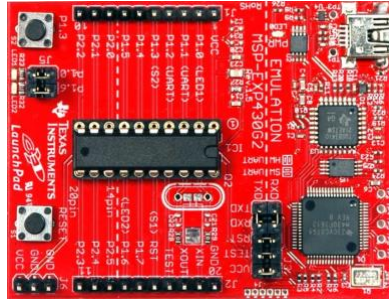


Figura 21 microcontrolador MSP430-G2553.

Control y programación.

Para el sistema se utilizó un control de error proporcional, se propuso el uso de este tipo de control, basado en las características del diseño y dejando un precedente para poder implementar más adelante otro tipo de control. El control proporcional es ampliamente utilizado en la industria, esto se debe a la facilidad de implementación. El funcionamiento deseado del sistema es el siguiente: La válvula se cierra, permitiendo un caudal mínimo cuando la radiación sea menor a 3.7 MED/h (Dosis Mínima Eritémica por hora, por sus siglas en inglés) y cuando ésta sea mayor de 4.2 MED/h se abre la válvula para permitir un caudal igual al que se estudió anteriormente, 1.5 L/min. Por último, en caso de que la radiación baje a menos de 1.5 MED/h entonces la válvula se cerrará por completo. Para ejemplificar mejor el sistema de control se creó el siguiente diagrama de bloques, figura 22.

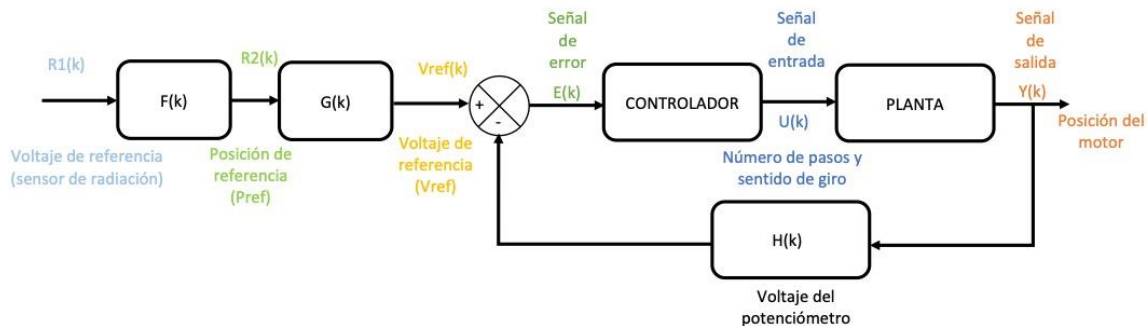


Figura 22 Diagrama de bloques del sistema de control empleado.



METODOLOGÍA

El sistema de control consiste en un programa con dos variables de entrada (voltaje del sensor de radiación UV y voltaje del potenciómetro) y dos variables de salida (sentido de giro del motor y número de pasos). El diagrama de flujo que se muestra en la figura 23 comienza con la lectura del voltaje del sensor de radiación, el cual nos dará la radiación instantánea y con base en este dato se establece un valor de referencia del flujo que se requiere. Una vez que se conozca la radiación aproximada se leerá el valor del voltaje del potenciómetro para saber si está más abierta o cerrada la válvula con respecto al valor de referencia, con base en este dato se decide el sentido de giro del motor, éste girará un número de pasos proporcionales a lo alejado que esté del valor deseado, antes de la próxima lectura para poder igualar el caudal deseado, todo el programa está basado en un control proporcional, es decir que el motor cierra la válvula en cuanto la radiación baje más allá de un umbral establecido en este programa o abra la válvula si la radiación es más intensa de lo normal.



METODOLOGÍA

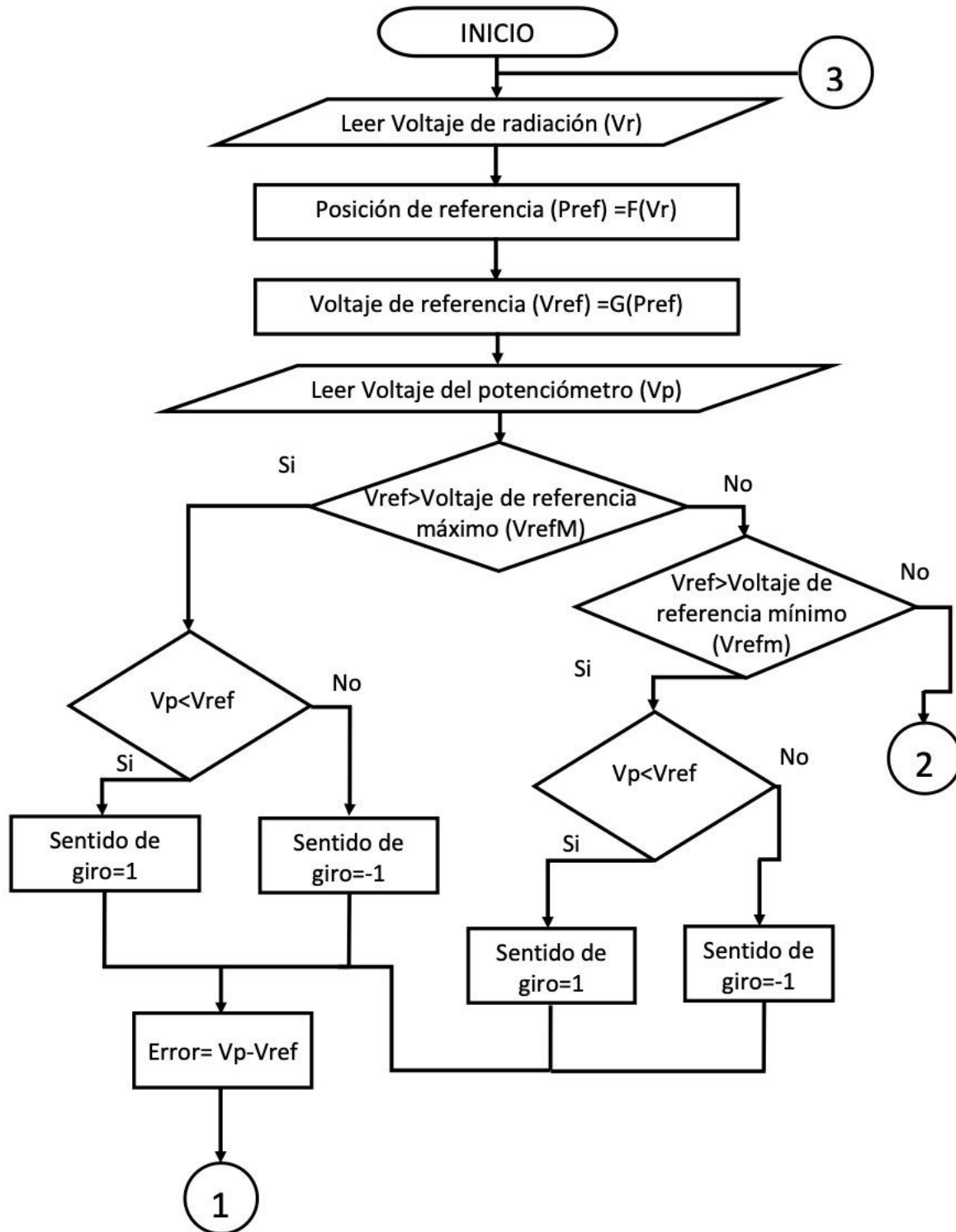


Figura 23 Programa controlador del sistema fotocatalítico primera parte.



METODOLOGÍA

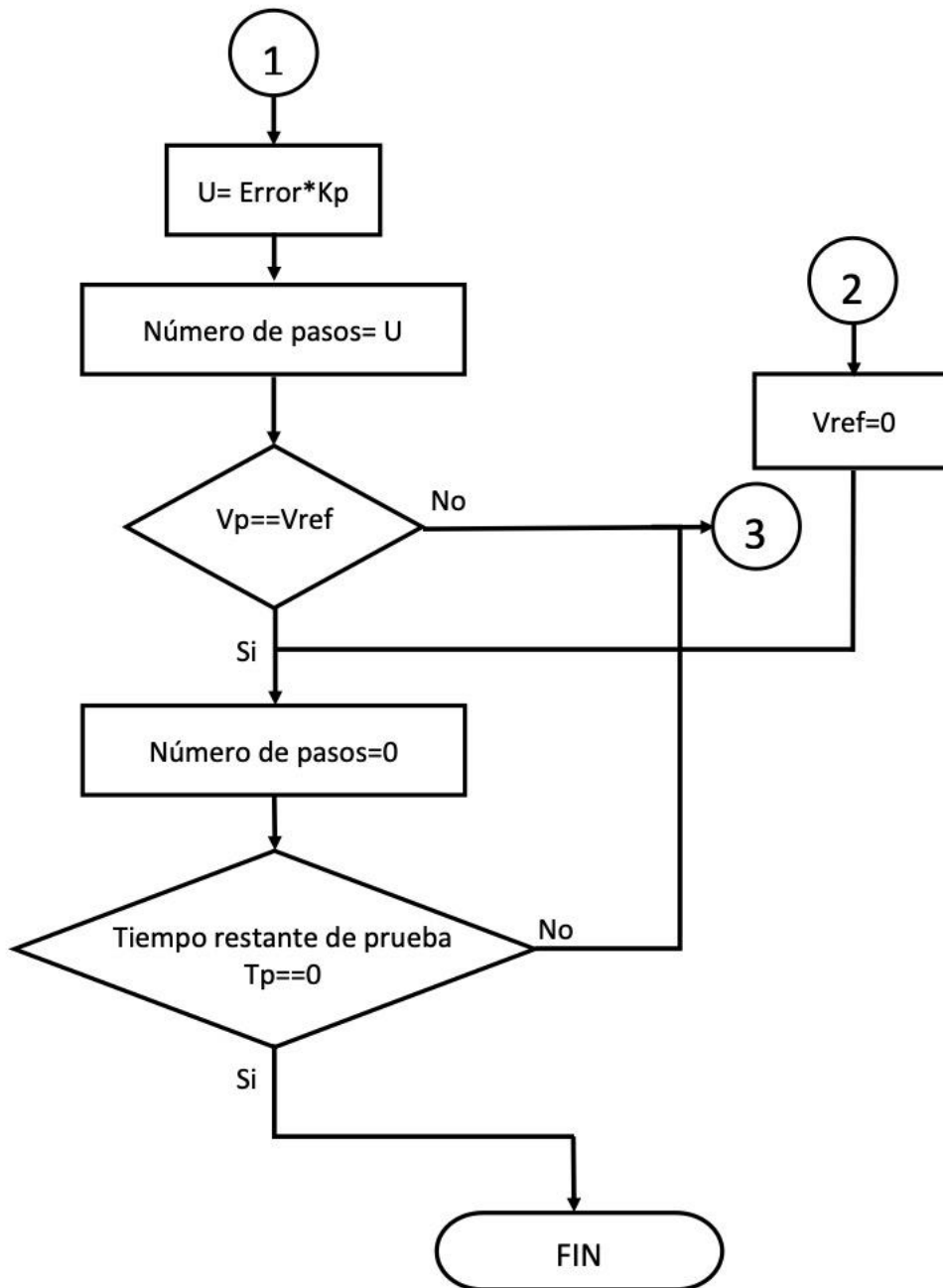


Figura 24 Programa controlador del sistema fotocatalítico segunda parte.



RESULTADOS

Curvas de radiación ultravioleta.

Se realizaron curvas con los datos obtenidos con el sensor ML8511 y se compararon con datos de radiación UV de la página web de la Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (DMA). En las figuras 25, 26 y 27, se muestran las mediciones obtenidas los días 06, 07 y 11 de julio de 2020, como se mencionó antes, el sensor ML8511 nos da un dato analógico que en estas figuras se llama “voltaje”, a este dato se le aplica un mapeo para obtener la información de la radiación UV referida a las unidades deseadas (mW/cm^2), para poder compararla con la proporcionada por la DMA. Las pruebas con el sensor fueron tomadas 3 días distintos.

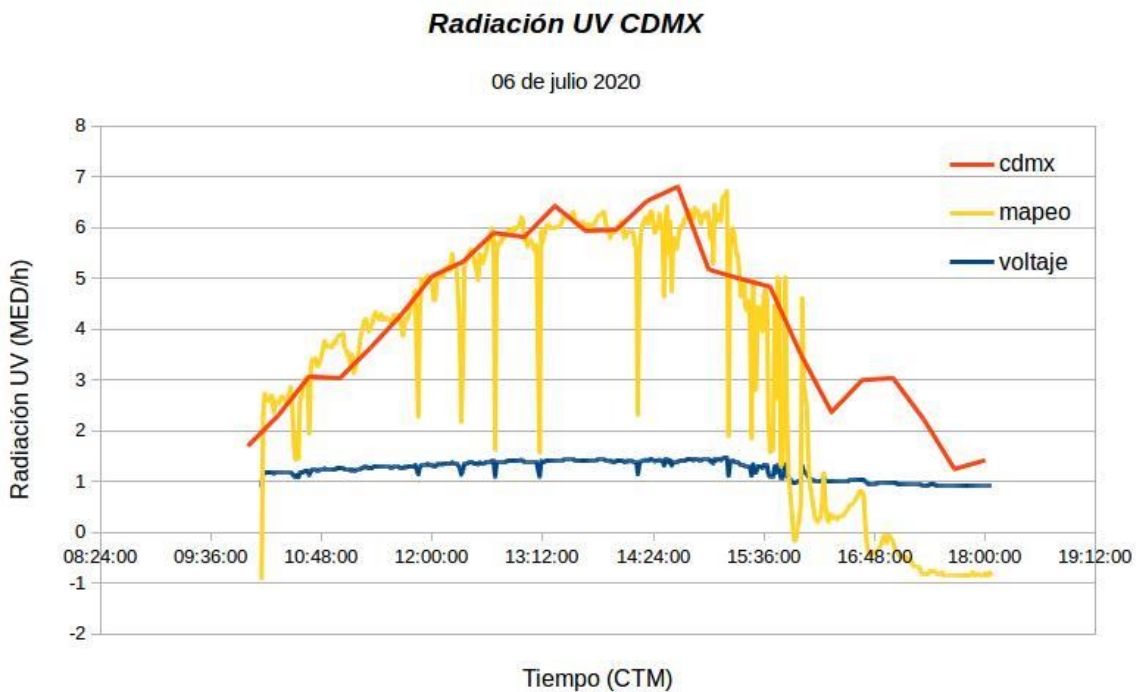


Figura 25 Gráfica del 6 de julio en CDMX, un día parcialmente soleado, las muestras se toman de 10:00 a 18:00.

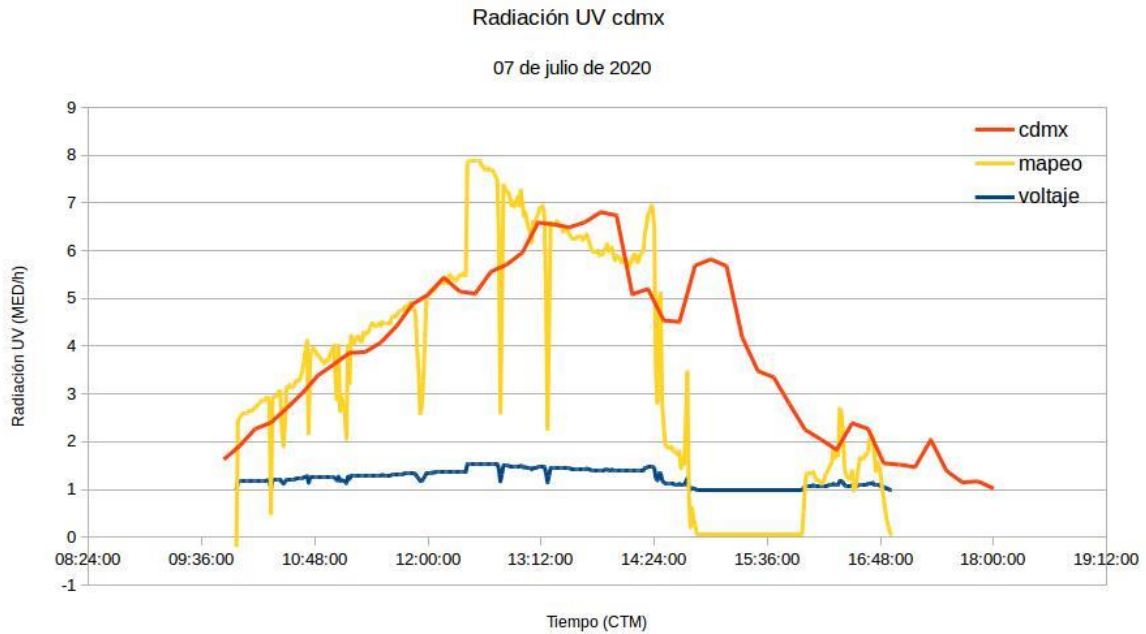


Figura 26 Gráfica del 7 de julio en CDMX, un día parcialmente soleado, con lluvia a las 14:30 horas, las muestras se toman de 10:00 a 18:00.

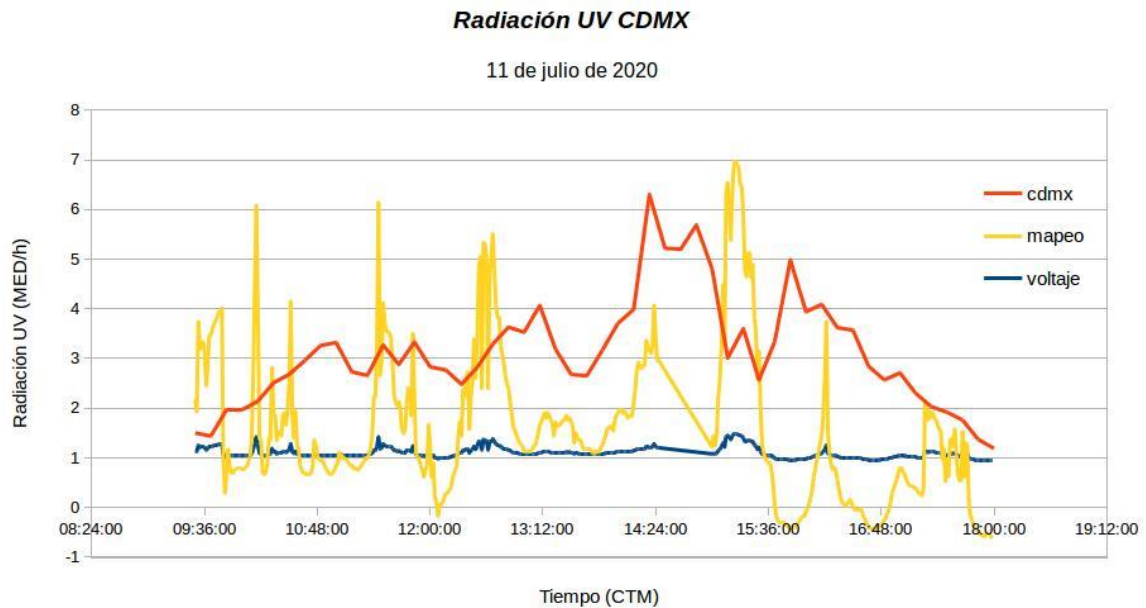


Figura 27 Gráfica del 11 de julio en CDMX, un día nublado, las muestras se toman de 09:00 a 18:00.

Como puede observarse en la figura 25, existe una aproximación bastante buena a los datos de la DMA, no obstante, algunos de los datos del mapeo suelen bajar de manera abrupta, estos cambios de valor se deben a nubes pasajeras o interacciones del medio con el sensor que son aleatorias. Los momentos en los que la gráfica toma un valor nulo o negativo por mucho tiempo representa los momentos con lluvia. Así mismo se muestra en la figura 26 un



día más nublado al anterior, y los desfases en los picos de las curvas de mapeo y CDMX se podrían relacionar con la distancia entre los sensores (30 km) y que las nubes tardan en llegar de un lugar a otro. En la figura 27 se ilustra que, en un día completamente nublado, la distancia entre los sensores crea señales completamente diferentes pues las condiciones climatológicas lo son.

Según datos de la DMA el día 07 de julio de los 3 días seleccionados fue el día con menos contaminación por O_3 en el Valle de México, es por eso la radiación UV se muestra mayor, hasta 8 MED/h (con el sensor ML8511) y un poco menos de 7 MED/h reportado por la DMA.

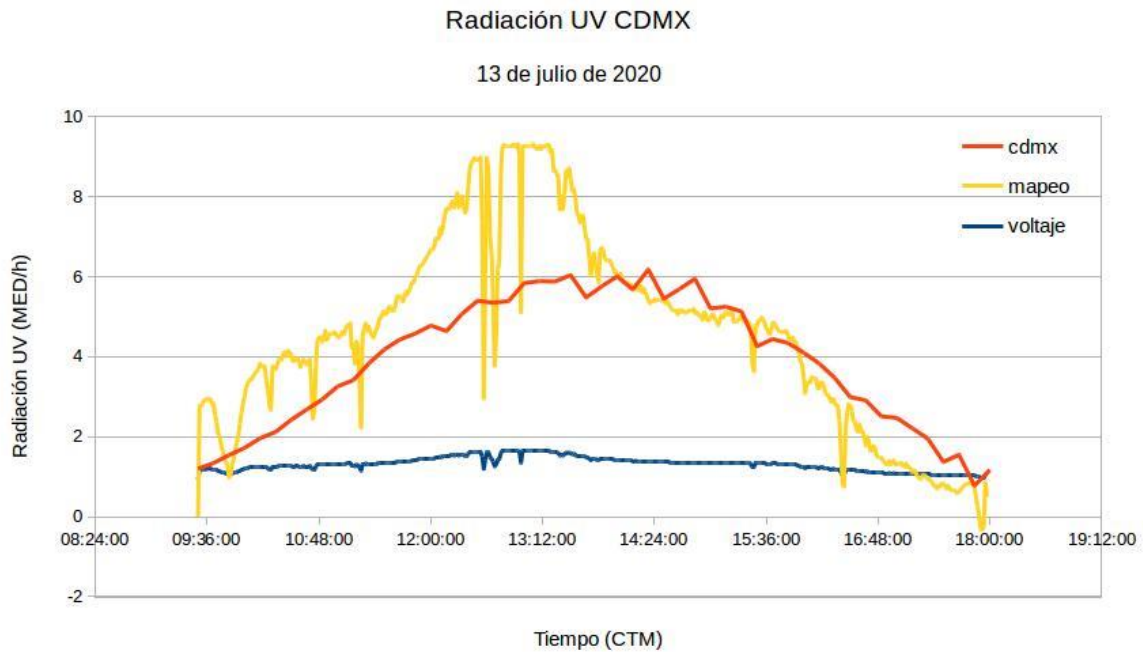


Figura 28 Gráfica del 13 de julio en CDMX, un día nublado, las muestras se toman de 09:00 a 18:00.

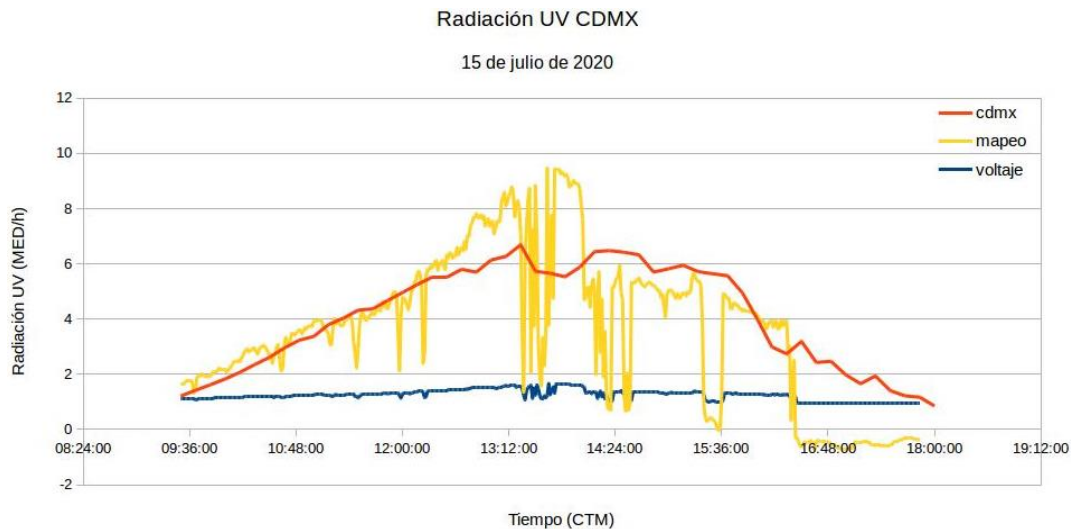


Figura 29 Gráfica del 15 de julio en CDMX, un día nublado, las muestras se toman de 09:00 a 18:00.



En las gráficas 28 y 29 se observa que el comportamiento de la señal del sensor en las condiciones de un día nublado es muy bueno, también se observa que a pesar de ser días nublados la radiación solar alcanza valores superiores a 4 MED/h, este valor se puede utilizar como referencia para la señal de control, ya que con este nivel de radiación el proceso fotocatalítico se puede llevar a cabo de manera satisfactoria.

Curvas de calibración del motor.

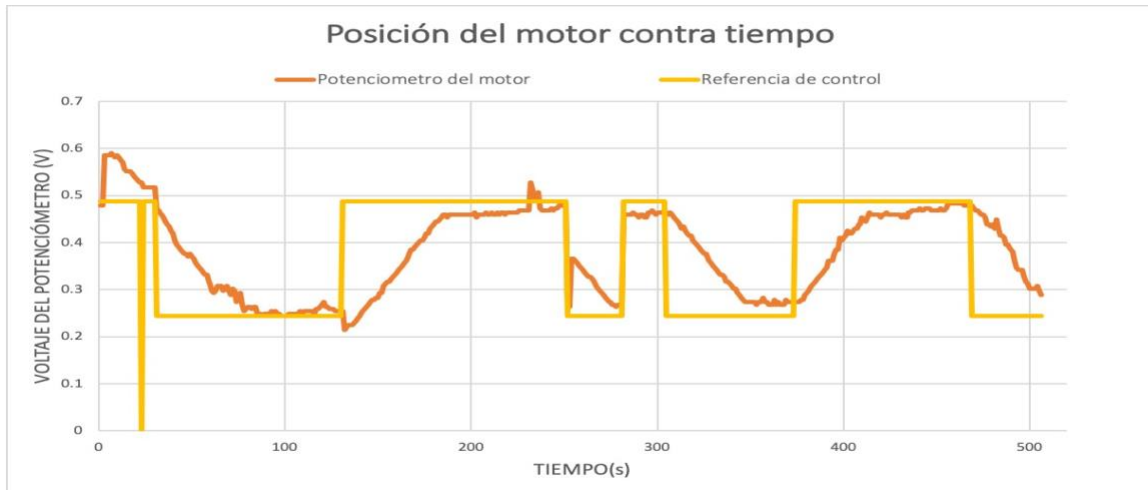


Figura 30 Respuesta del motor en ante una señal de radiación simulada.

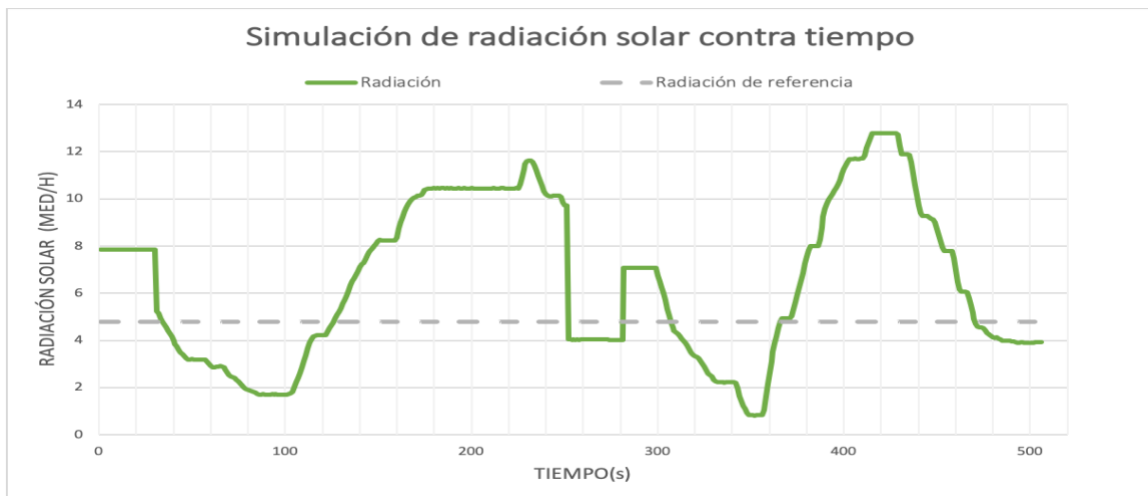


Figura 31 Señal de radiación UV simulada con un potenciómetro.

Como puede observarse en la figura 30, el potenciómetro conectado al motor sigue la señal de control (figura 31) de manera lenta debido a la constante proporcional seleccionada, esto es un hecho que nos ayudará a evitar cambios bruscos en el motor debidos a nubes pasajeras, esto puede asemeja un filtro para los ruidos causados por objetos que interfieran en la señal



(nubes, aves, hojas, entre otros). Como se observa en la figura 31 la señal de control discreta tiene un comportamiento similar al que existe en condiciones de un día nublado, es decir hay radiaciones bajas y cambios abruptos que igualan un día con grandes nubes, estas condiciones permitirán probar el sistema en días cuando la radiación no es óptima. El cambio en la señal de control deberá ser lenta, del orden de los segundos, lo que representa un cambio gradual, como sucede con la radiación solar real.

En la figura 31 se observa la señal simulada con un potenciómetro, la línea punteada es el umbral de radiación que marca el encendido o apagado de la señal de control para poder mantener el flujo a 0.25 l/min cuando se tiene una radiación mayor o igual a 4.8 MED/h, y mantendrá el flujo a 0.15 l/min cuando la señal esté por debajo de 4.8 MED/h. En estas gráficas la radiación fue mayor a 1.5 MED/h en todo momento, por lo que no hubo necesidad de un cierre total de la válvula, es decir se simularon datos de un día prácticamente soleado.

CONCLUSIONES

La válvula seleccionada es una válvula comercial de 1 pulgada y con base en las especificaciones se encontró que un torque de $0.98 [N \cdot m]$, como el que ofrece nuestro motor, es más que suficiente, por lo que no presentó ningún tipo de atrancamiento al abrir o cerrar la válvula y el potenciómetro al mismo tiempo. El diseño de los acoplamientos entre el motor y la llave dejan espacio para poder integrar diferentes diámetros de llave o motor, puesto que se agregó al diseño un tornillo esclavo.

En la gráfica de la figura 30 se observa que el motor sigue de manera correcta la señal de entrada o referencia de control, con lo que su comportamiento será adecuado para el sistema. Este sistema puede trabajar de manera continua durante todo el día, es decir cuando exista radiación solar que lo permita.

El programa de control que se trabajó fue un control proporcional, las ventajas de dicho control es la sencillez del funcionamiento y su implementación ayudó a bosquejar el comportamiento de las variables de control y la salida del sistema que serán de ayuda cuando se ponga en marcha este sistema de manera integrada.

Para finalizar, los datos obtenidos con el sensor ML8511 se comportan de manera similar a los datos proporcionados por la DMA y esto nos permite concluir que el monitoreo de la radiación solar para generar una señal de control para nuestro sistema de control se logró exitosamente, sin embargo, las interferencias (nubes, lluvia o personas) o ruido del sensor es alto, esto puede significar un incremento en el error del sistema, que se debe tomar en cuenta para la implementación del programa de control. Las interferencias pueden significar un reto para la programación, pero este problema se puede resolver con la implementación de un filtro digital, que permita que las lecturas entre cada muestra sean más claras.



TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se presentó un sistema regulación de caudal con base en la radiación ultravioleta en un proceso fotocatalítico, pero tiene muchas áreas de oportunidad para poder mejorar, una de estas áreas es el desarrollar aún más el sistema de control presentado anteriormente, planteando un modelo matemático para poder interpretar mejor su comportamiento.

En esta tesis se dedicó especial atención en diseñar y programar un prototipo funcional para controlar un flujo de agua para su purificación, con base en la radiación solar ultravioleta. Por lo que a futuro se debe de implementar de manera física, para así crear curvas de calibración para el sistema, además de que se brinde una retroalimentación sobre el desempeño de la planta respecto a la planta sin ningún tipo de control.

Algunas de las pruebas que se realizaron en este trabajo se realizaron con ayuda del sensor ML8511 conectado directamente al microcontrolador y se corre el programa de manera manual para poder obtener los datos cada cierto tiempo, después se desarrolló un sistema de transmisión de datos vía wi-fi que permite obtener los datos del sensor y del motor en tiempo real desde cualquier lugar sin la necesidad de que el programador esté presente en el lugar en el que se llevan a cabo las pruebas. Es decir, con la implementación del Internet de las cosas podríamos supervisar la planta desde cualquier lugar y así tener la certeza de que se encuentra trabajando sin la necesidad de arriesgarnos a la exposición prolongada a la radiación solar. El sistema de obtención de datos mediante internet de las cosas no fue el objetivo de este trabajo, por lo que no se profundizó en él, pero se deja un precedente para que se continúe y mejore dicho sistema, con gráficas en tiempo real, una interfaz de usuario, entre otras características que pueden ser desarrolladas en un futuro.

El control que se utiliza aquí es muy sencillo pero robusto, en un futuro este control se puede cambiar por otro más elaborado y que muestre que la eficiencia del sistema aumenta respecto a lo que se ha trabajado en esta tesis.



BIBLIOGRAFÍA

- Cifuentes, E. B.-P. (1991). Health impact evaluation of wastewater use in Mexico. *Public health reviews*, 243-250.
- CONAGUA, C. (2018). *Estadísticas del agua en México*. México: CONAGUA.
- Acosta, L. R. (2000). Desing of the Mexico City UV monitoring network: UV-B measurements at ground level in the urban enviorment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.*, 5017-5026.
- Amenta, S. &. (2018). *Advanced oxidation processes for wastewater treatment: emerging green chemical technology*. Londres: Academic Press.
- Barceló, D. (2008). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes*. Sevilla: Convenio Universidad de Sevilla-Ministerio de Medio Ambiente .
- Burek, P. S. (2016). *Water futures and solution-fast track initiative*. Luxemburgo: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Flores, Á. N. (2021). Intensificación del proceso fotocatalítico utilizando un mezclador estático. *Tesis de Doctorado*. UNAM, México.
- Ghetti, F. C. (2006). *Environmental UV Radiation: Impact on Ecosystems and Human Health and Predictive Models: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Environmental UV Radiation: Impact on Ecosystems and Human Health and Predictive Models*. Pisa: Springer Science & Business Media.
- Manahan, S. (2010). *Water chemistry: green science and technology of nature's most renewable resource*. Nueva York: CRC Press.
- Núñez-Flores, A. S.-M. (2020). Enhacement of photocatalytic degradation of ibuprofen contained in water using a static mixer. *Chemical Engineering Research an Design*, 54-63.
- Nakata, K. &. (2012). TiO₂ photocatalysis: Design and applications. *Journal of photochemistry and photobiology*, 169-189.
- Organization, W. H. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wasterwater excreta and greywater (Vol. 1)*. París: World Health Organization.
- Semarnat. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México: compendio de las estadísticas ambientales*. México: SEMARNAT.
- Skoog, D. A. (2008). *Principios de análisis instrumental*. México: Cengage Learning.
- Vázquez, J. C. (2003). *Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar*. Almería: CIEMAT.
- Vázquez, M. &. (2005). *Ultraviolet radiation in the solar system* . Dordrecht: Springer Science & Business Media.
- WATER, U. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales, el recurso desaprovechado*. París: UNESCO.
- World Health Organization, &. I.-I. (2002). (2002). *Indice UV solar mundial: guía práctica (No. WHO/SDE/OEH/02.2)* . Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- WWAP, T. (2019). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrllo de los Recursos Hídricos 2019: no dejar a nadie atrás* . París: UNESCO.

ANEXOS

ANEXO 1: HOJAS DE DATOS DEL SENSOR ML8511

**FEDL8511-05**Issue Date: March 08, 2013ML8511

UV Sensor with Voltage Output

GENERAL DISCRPTION

The ML8511 is a UV sensor, which is suitable for acquiring UV intensity indoors or outdoors. The ML8511 is equipped with an internal amplifier, which converts photo-current to voltage depending on the UV intensity. This unique feature offers an easy interface to external circuits such as ADC. In the power down mode, typical standby current is 0.1 μ A, thus enabling a longer battery life.

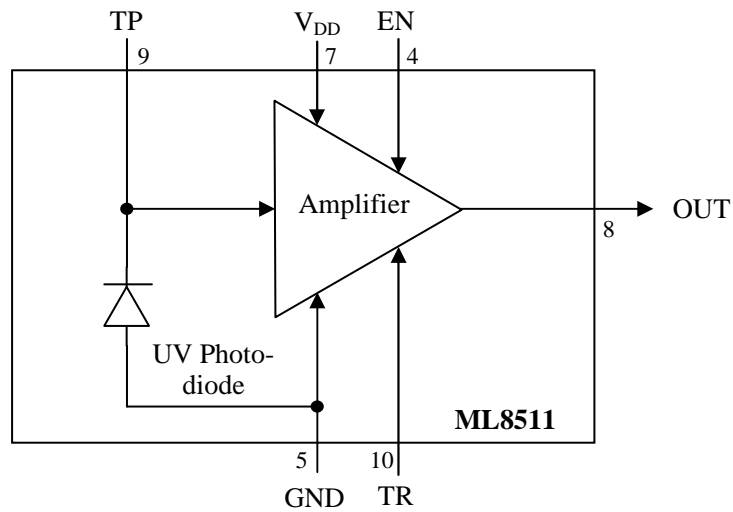
FEATURES

- Photodiode sensitive to UV-A and UV-B
- Embedded operational amplifier
- Analog voltage output
- Low supply current (300 μ A typ.) and low standby current (0.1 μ A typ.)
- Small and thin surface mount package (4.0mm x 3.7mm x 0.73mm, 12-pin ceramic QFN)

APPLICATIONS

- Smart phone, Watch, Weather station, Bicycle navigation, Accessary, Gaming

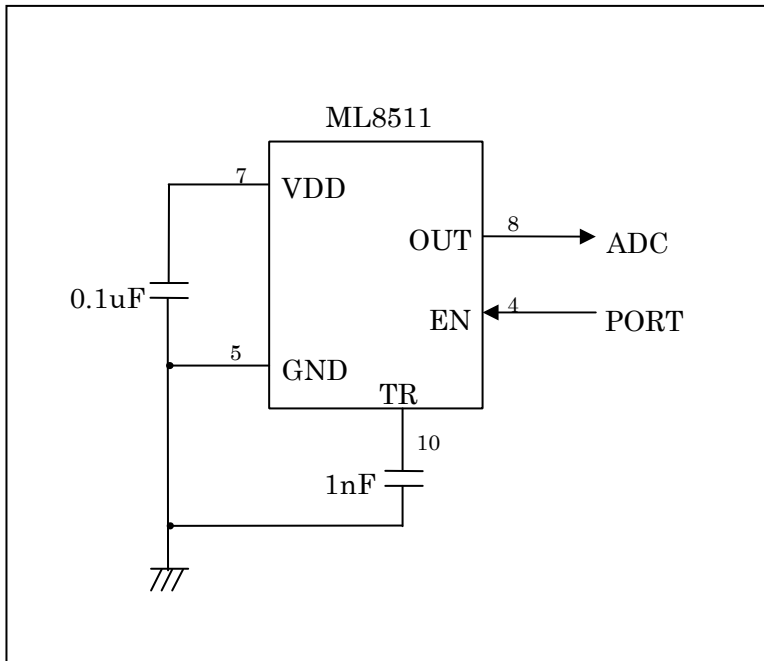
BLOCK DAIAGRAM



PIN CONFIGURATIONS

Pin	Symbol	I/O	Function
7	VDD	PW	Supply voltage. Decouple this pin to ground with 0.1 μ F capacitor.
5	GND	PW	Ground
4	EN	I	Active high enable pin. (High: Active mode, Low: Standby mode)
8	OUT	O	Output (Low in power down or standby mode)
9	TP	I/O	Test pin. Do not connect.
10	TR	I/O	Internal reference voltage. Decouple this pin to ground with 1 nF capacitor.
1,2,3, 6,11,12	NC	-	No Connection. Do not connect.

EXAMPLE OF CONNCTING DIAGRAM



* Load resistance of OUT port is recommended more than 100 k Ω .

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Symbol	Condition	Rating	unit
Supply Voltage	V _{DD}	T _a =25 $^{\circ}$ C	-0.3 to +4.6	V
Input Voltage	V _I	T _a =25 $^{\circ}$ C	-0.3 to +4.6	V
Output Short Current	I _{OS}	T _a =25 $^{\circ}$ C	5	mA
Power Dissipation	P _D	T _a =25 $^{\circ}$ C	30	mW
Storage Temperature	T _{stg}	-	-30 to +85	$^{\circ}$ C

RECOMENDED OPERATION CONDITIONS

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	unit
Operating Voltage	V _{DD}	2.7	3.3	3.6	V
Operating Temperature	T _a	-20	-	70	$^{\circ}$ C

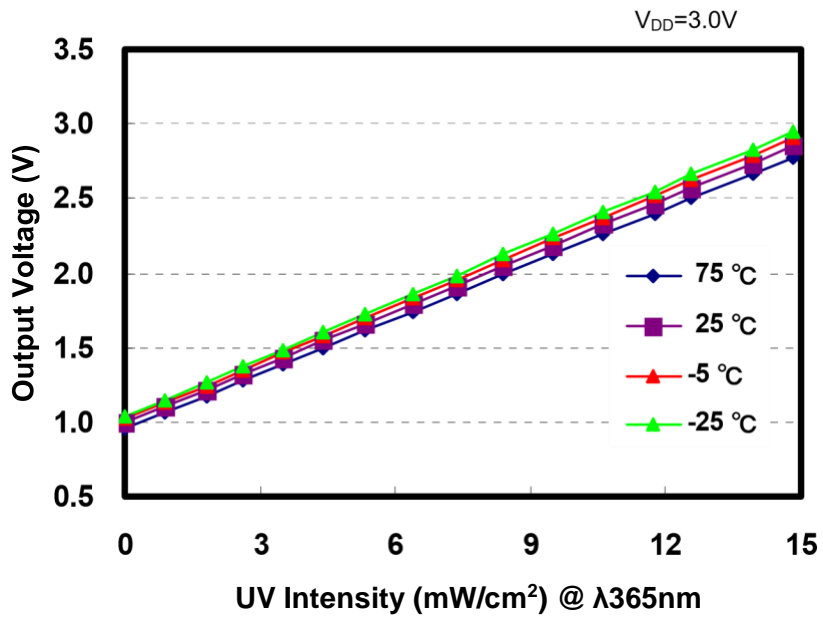
ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS

($V_{DD}=+2.7V$ to $+3.6V$, $T_a=-20\text{°C}$ to $+70\text{°C}$)

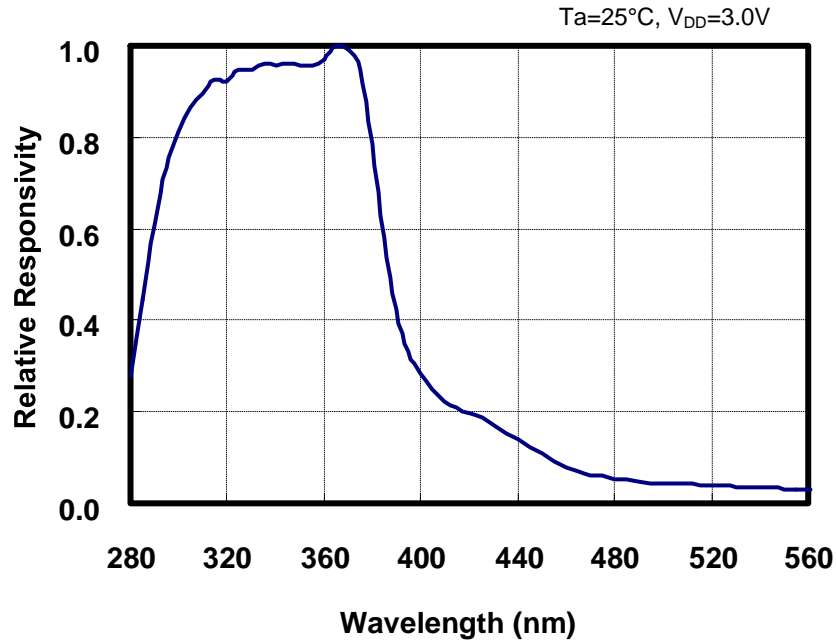
Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	unit
Supply Current (active mode)	I_{DDA}	$V_{EN}=V_{DD}$	-	300	500	μA
Supply Current (standby mode)	I_{DDS}	$V_{EN}=0$	-	0.1	1	μA
Input Voltage (High level)	V_{IH}	-	$V_{DD} \times 0.8$	-	$V_{DD} + 0.3$	V
Input Voltage (Low level)	V_{IL}	-	-0.2	-	0.72	V
High level input current	I_{IH}	$V_{EN}=V_{DD}$	-	-	1	μA
Low level input current	I_{IL}	$V_{EN}=0$	-1	-	-	μA
Wavelength of maximum sensitivity	λ_p	$T_a=25\text{°C}$	-	365	-	nm
Output Setup Time	T_{SU}	$V_{EN}=V_{DD}$	-	-	1	ms
Output Voltage (Shading) *	V_{REF}	$T_a=25\text{°C}$, $V_{EN}=V_{DD}$	0.95	1.0	1.05	V
Output Voltage (10mW/cm ² at λ_p) *	V_O	$T_a=25\text{°C}$, $V_{EN}=V_{DD}$	2.08	2.2	2.32	V

* Load resistance of OUT port is recommended more than 100 k Ω .

OUTPUT VOLTAGE- UV INTENSITY CHARACTERISTICS



SPECTRAL RESPONSIVITY CHARACTERISTICS

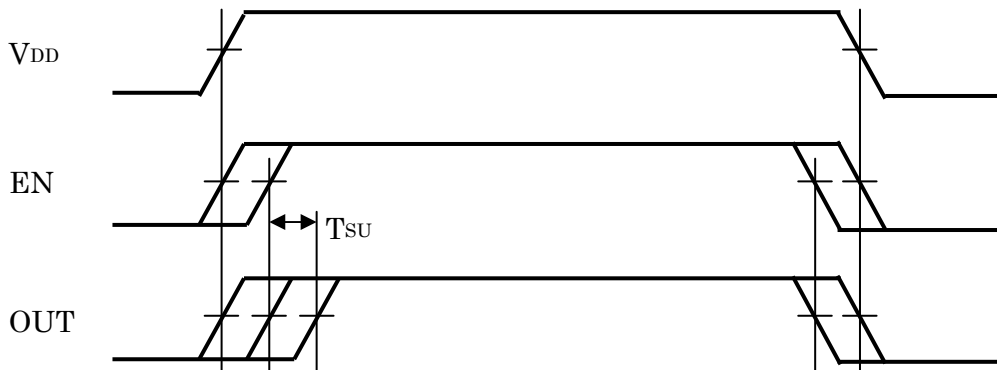


TIMING CHART

Supply voltage and EN signal state should take one of the following procedures:

1. EN should be HIGH or LOW at the same time when V_{DD} is applied.
2. EN should be HIGH or LOW while V_{DD} is applied.

Output should be read after output voltage level becomes stable. Maximum time required until stable output voltage reaches is 1 millisecond after EN goes HIGH.



REVISION HISTORY

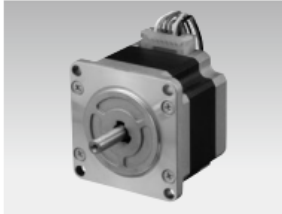
Document No.	Date	Page		Description
		Previous Edition	Current Edition	
FEDL851100FC-01	Sep. 3, 2008	-		Preliminary edition
FEDL8511-02	Jan. 24, 2008	-	1	Added disclaimer
FEDL8511-03	Nov. 7, 2008	-	-	Changed Logo OKI to OKI SEMICONDUCTOR
		1	5	The following items has been moved: PACKAGE, NOTICE, PRECAUTION and DISCLAIMER.
		2	1	The following items have been moved: BLOCK DIAGRAM and PIN CONFIGURATION
		3	2	The following tables has been partially modified: RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS
		3	2	Changed load resistance 500 k Ω to 100 k Ω
		-	3	Added graphs
		-	4	Added "TIMING CHART"
FJDL8511-04	Jan. 17, 2013	1	1	Feature description is removed. Applications section is added.
		4	4	Explanation is provided to the timing chart.
		5	5	Package drawing is updated. Descriptions in the NOTE are modified. DISCLIMER is removed.
FJDL8511-05	Mar. 8, 2013	1	1	Descriptions in Pin configurations are modified.
		-	2	Example of connecting diagram is added.



ANEXOS

ANEXO 2: HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL MOTOR 103H7121-XXXX.

Stepping Motors



56 mm sq.

1.8°/step **RoHS**

Unipolar winding, Lead wire type
Bipolar winding, Lead wire type p. 54

Customizing

Hollow Shaft modification
Decelerator Encoder

Varies depending on the model number and quantity. Contact us for details.

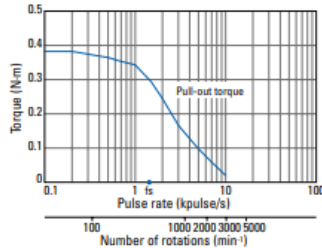
Unipolar winding, Lead wire type

Model no.		Holding torque at 2-phase energization N·m min.	Rated current A/phase	Wiring resistance Ω /phase	Winding inductance mH/phase	Rotor inertia $\times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$	Mass kg	Motor length (L) mm
Single shaft	Dual shaft							
103H7121-0140	103H7121-0110	0.39	1	4.8	8	0.1	0.47	41.8
103H7121-0440	103H7121-0410	0.39	2	1.25	1.9	0.1	0.47	41.8
103H7121-0740	103H7121-0710	0.39	3	0.6	0.8	0.1	0.47	41.8
103H7123-0140	103H7123-0110	0.83	1	6.7	15	0.21	0.65	53.8
103H7123-0440	103H7123-0410	0.83	2	1.6	3.8	0.21	0.65	53.8
103H7123-0740	103H7123-0710	0.78	3	0.77	1.58	0.21	0.65	53.8
103H7124-0140	103H7124-0110	0.98	1	7	14.5	0.245	0.8	63.8
103H7124-0440	103H7124-0410	0.98	2	1.7	3.1	0.245	0.8	63.8
103H7124-0740	103H7124-0710	0.98	3	0.74	1.4	0.245	0.8	63.8
103H7126-0140	103H7126-0110	1.27	1	8.6	19	0.36	0.98	75.8
103H7126-0440	103H7126-0410	1.27	2	2	4.5	0.36	0.98	75.8
103H7126-0740	103H7126-0710	1.27	3	0.9	2.2	0.36	0.98	75.8

Characteristics diagram

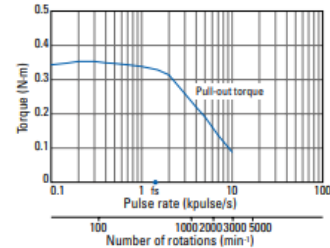
103H7121-0140
103H7121-0110

Constant current circuit
Source voltage: 24 VDC
Operating current:
1 A/phase, 2-phase
energization (full-step)
Pull-out torque:
 $J=0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ (use the
rubber coupling)
 f_s : Maximum self-start
frequency when not
loaded



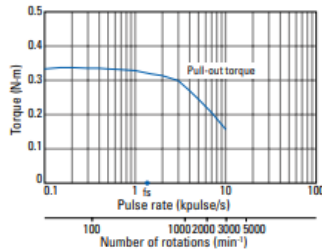
103H7121-0440
103H7121-0410

Constant current circuit
Source voltage: 24 VDC
Operating current:
2 A/phase, 2-phase
energization (full-step)
Pull-out torque:
 $J=0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ (use the
rubber coupling)
 f_s : Maximum self-start
frequency when not
loaded



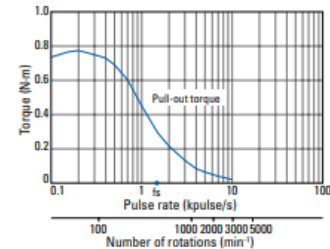
103H7121-0740
103H7121-0710

Constant current circuit
Source voltage: 24 VDC
Operating current:
3 A/phase, 2-phase
energization (full-step)
Pull-out torque:
 $J=0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ (use the
rubber coupling)
 f_s : Maximum self-start
frequency when not
loaded



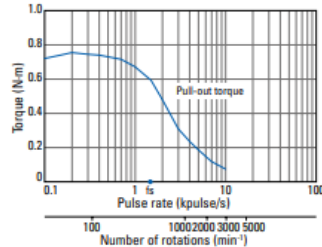
103H7123-0140
103H7123-0110

Constant current circuit
Source voltage: 24 VDC
Operating current:
1 A/phase, 2-phase
energization (full-step)
Pull-out torque:
 $J=0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ (use the
rubber coupling)
 f_s : Maximum self-start
frequency when not
loaded



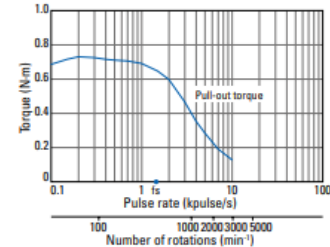
103H7123-0440
103H7123-0410

Constant current circuit
Source voltage: 24 VDC
Operating current:
2 A/phase, 2-phase
energization (full-step)
Pull-out torque:
 $J=0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ (use the
rubber coupling)
 f_s : Maximum self-start
frequency when not
loaded



103H7123-0740
103H7123-0710

Constant current circuit
Source voltage: 24 VDC
Operating current:
3 A/phase, 2-phase
energization (full-step)
Pull-out torque:
 $J=0.94 \times 10^{-4} \text{kg}\cdot\text{m}^2$ (use the
rubber coupling)
 f_s : Maximum self-start
frequency when not
loaded





ANEXOS