

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE ELECTROTECNIA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR FOTO CATALÍTICO CON
SEPARACIÓN MAGNÉTICA PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES
ORGÁNICOS EN AGUA

Trabajo para el Proyecto Integrador Profesional presentado por

EUGENIO MANZANO

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para acceder al
título de

INGENIERO ELECTRÓNICO

Dirección de tesis:

Dr.-Ing. Alejandro Koffman Frischknecht

Dr.-Ing. Nicolás Calarco

Neuquén, 29/11/2022

Resumen

El tratamiento de aguas es el conjunto de técnicas desarrolladas para eliminar contaminantes, principalmente de los efluentes industriales y domésticos. La aparición constante de los llamados "contaminantes emergentes" requiere la implementación de nuevas técnicas de tratamiento. Particularmente, para la eliminación de contaminantes orgánicos se pueden utilizar técnicas fotocatalíticas, como la fotocatálisis heterogénea y procesos foto-Fenton, que aprovechan energía de la luz para lograr procesos eficientes. Para lograr la optimización es necesario ensayar los materiales fotocatalizadores con diferentes contaminantes, lo que permite definir las mejoras necesarias.

Para integrar estas técnicas avanzadas, se construyó un reactor foto catalítico con recuperación magnética para retener el catalizador, ya sea para su reutilización o recuperación. El mismo cuenta con un sistema de iluminación LED UV, un sistema de separación magnética y un conjunto de sensores para monitorear los parámetros más importantes del proceso.

El diseño se basó en buscar la sencillez de la electrónica implementada para identificar fallas rápidamente y poder solucionarlas contando con una interfaz intuitiva y un fácil seguimiento de los parámetros de interés en este tipo de reacciones. Se buscó no sólo que sirviera como prototipo de laboratorio actuando como sistema de prueba de materiales y contaminantes, sino que también fuera de fácil escalabilidad para una implementación a nivel industrial.

Palabras clave: reactor foto catalítico, fotocatálisis heterogénea, foto-Fenton

Abstract

Water treatment consists of a group of techniques developed to eliminate contaminant components, mainly referring to industrial and domestic effluents. The appearance of what is called "emerging contaminants" requires the implementation of new treatment techniques. In particular, in order to eliminate organic contaminants there are photocatalytic techniques that can be used, such as heterogeneous photocatalysis and photo-Fenton processes, which take advantage of the light energy to achieve efficient processes. To reach the optimization,

it is necessary to test the photocatalytic materials with different contaminants, allowing the discovery of necessary improvements.

To integrate these advanced techniques, a photocatalytic reactor was built with magnetic separation with the purpose of retaining the catalyst, either for reuse or for recovery. It counts with an UV-LED-lighting system, a magnetic separation system and a set of sensors to monitor the most important parameters of the process.

The design was based on seeking the simplicity of implemented electronics to quickly identify failures and be able to solve them with an intuitive interface and a simple monitoring of the parameters of interest in this type of reaction. The reactor was not only meant to serve as a laboratory prototype acting as a materials and contaminants trial system, but also to be easily scalable for industrial-level implementation.

Key words: photocatalytic reactor, heterogenous photocatalysis, photo-Fenton process

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecerle a mi familia que fue el principal soporte para que pueda terminar los estudios. También a mis amigos y compañeros que estuvieron para apoyarme y acompañarme en el transcurso de la carrera, en especial a Pablo Blanco, Lautaro Sáez, Santiago Martín y Javier Arce, que me brindaron ideas y ayuda en el transcurso de la implementación. Al Doctor Ingeniero Alejandro Koffman Frischknecht que me guió a través de todo el proceso del trabajo final, por su paciencia y dedicación, y con quien fue un gusto llevar a cabo este desarrollo. Al Ingeniero Matías Córdoba, que me dio una gran ayuda para el armado del circuito del electroimán. Por último, pero no menos importante, al equipo del PROBIEN y al Doctor Ingeniero Nicolás Calarco, por su guía y soporte.



Contenido

Resumen	ii
Abstract.....	ii
Agradecimientos.....	iii
1. Introducción.....	1
2. Conceptos Teóricos	2
2.1. Catalizador	2
2.2. Radical	3
2.3. Fotocatálisis heterogénea.....	3
2.4. Foto-Fenton.....	4
2.5. Reactores.....	5
2.5.1. Reactor de lecho empacado rotatorio	5
2.5.2. Reactor secuencial.....	6
2.5.3. Reactor de lecho fijo con membranas de separación magnética.....	7
3. Hardware/Aspectos constructivos	8
3.1. Diseño de un reactor foto catalítico de separación magnética.....	8
3.2. Implementación	9
3.3. Hardware Utilizado.....	10
3.3.1. Placa Arduino Nano	11
3.3.2. Placa NodeMCU ESP-12E.....	12
3.3.3. Elección de los microcontroladores	13
3.4. Periféricos:.....	14
3.4.1. Sensor PH.....	14
3.4.2. Sensor de temperatura	15
3.4.3. Relay arduino	16



3.4.4. Electroimán	16
3.4.5. Radiación UV	23
3.4.6. Agitador.....	26
3.5. Placa principal de control	29
3.6. Estructura y soportes.....	30
4. Software.....	30
4.1. Algoritmo.....	30
4.2. Interfaz y Funcionamiento	32
4.3. Consideraciones del código	36
5. Ensayos.....	37
5.1. Temperatura de los LEDs UV bajo condiciones operativas	37
5.2. Funcionamiento del electroimán.....	39
5.3. Retención de nano partículas por campo magnético.....	41
5.4. Degradación del contaminante.....	47
5.4.1. Degradación a pH 3.....	47
5.4.2. Degradación a pH 4.....	50
6. Conclusión	51
7. Referencias Bibliográficas.....	52
8. Anexo	55
8.1. Librerías arduino utilizadas	55
8.2. Manual del usuario.....	55
8.2.1 Encendido del reactor:.....	55
8.2.2. Operación	56
8.2.3. Sensores.....	57
8.2.4. Conexiones y Hardware	58



8.2.5. Placa de control del agitador	60
8.2.6. Interfaz a través del servidor web Ubidots	61
8.2.7. Observaciones	62

1. Introducción

El crecimiento demográfico no siempre suele estar acompañado de una infraestructura que cumpla con las normas establecidas para el cuidado del medio ambiente. El incremento constante de la población ocasiona que muchas veces exista un desfase entre los servicios prestados y los necesarios. Podemos nombrar como ejemplo a las plantas de tratamiento de aguas, que en varias ocasiones se encuentran trabajando por encima de su capacidad, lo que no permite cumplir con los estándares establecidos. Es así como el producto final se libera al ambiente, con las implicancias que ello tiene.

El agua es un recurso natural esencial para el desarrollo de la vida en la tierra. Se la utiliza para consumo, agricultura, eliminar desechos, limpieza y desinfección, refrigeración de dispositivos, entre otros. El 97,5% del agua de la tierra se encuentra en los océanos y mares, sólo el 2,5% es agua dulce. El 69% de la totalidad de agua dulce se encuentra en los polos y glaciares, el 30% en el suelo y en las napas; y sólo el 1% se encuentra en ríos, arroyos y lagos [1]. Como todo recurso natural, si no se hace un buen uso del mismo, la cantidad disponible se reduce. He aquí la importancia del cuidado y preservación, no solo para las generaciones presentes, sino para las generaciones futuras.

Las aguas grises y negras son, a largo plazo, muy nocivas para el medio ambiente. Suelen contener antibióticos, bacterias difíciles de eliminar, productos farmacéuticos, entre otros. Los agroquímicos también contienen compuestos que deben ser tratados para dejarlos inactivos y evitar que perdure su efecto a lo largo del tiempo [3]. Todos estos productos suelen encontrarse en las aguas de desecho. Al trasladarse el fluido, esparce todas estas sustancias, aumentando la superficie afectada.

Existen varios tratamientos para el agua de desecho. Algunos de ellos son procesos de tecnología de cambios de fase, adsorción por uso de carbón activado o por biocarbón, o filtrado a través de membranas. Se destacan los procesos de oxidación avanzada, que pueden lograr una mineralización de los componentes orgánicos presentes sin dejar subproductos. Algunos de estos son los procesos de foto catálisis y foto-Fenton [4]. La optimización de estos procesos se realiza desde la ciencia de materiales o mediante el control de condiciones

del medio en donde sucede la reacción, para lo cual es necesario contar con una sistema de prueba de fotocatalizadores y contaminantes.

Este trabajo se centra en los procesos de tratamiento de la fotocatálisis heterogénea y el foto-Fenton, por ser técnicas con gran potencial de descontaminación.

El objetivo de este desarrollo fue el diseño y la construcción de un sistema de prueba de fotocatalizadores magnéticos. Para el cual se buscó como principales características la robustez y la sencillez en todos sus aspectos. La automatización aporta gran ventaja para el usuario, que puede hacer un seguimiento remoto del proceso y de los parámetros de interés de la reacción.

Este trabajo se divide en varios capítulos. En el siguiente, el número dos, se explican distintos **Conceptos teóricos** que ayudarán al lector a familiarizarse con las reacciones que permiten descontaminar el agua y los reactores que para ello se han desarrollado. El tercer capítulo se enfoca en todos los aspectos correspondientes al **Hardware**. Allí se describen todas las consideraciones del armado, luego se detallan las características de los controladores utilizados, los periféricos instalados y las adaptaciones. El cuarto capítulo se centra en los aspectos correspondientes al **Software**, el algoritmo que permite el funcionamiento. El quinto capítulo se centra en los **Ensayos** del reactor y sus componentes, se analiza el circuito implementado para el electroimán, la capacidad de retención de nano partículas, el sistema de disipación de temperatura de los LEDs UV, y los resultados de un tratamiento de agua modelo, utilizando un proceso foto-Fenton con nano partículas de magnetita (Fe_3O_4) para degradar azul de metileno. Finalmente, se añaden las **Conclusiones** del trabajo en el sexto capítulo.

2. Conceptos Teóricos

2.1. Catalizador

Un catalizador es una sustancia que permite que se lleve a cabo una reacción química por un camino alternativo en necesidad de una menor energía de activación. Participa en la reacción química sin experimentar cambios permanentes, por lo que no aparece en la ecuación química global. Existen dos tipos básicos de catálisis, la homogénea y la heterogénea. [5]

2.2. Radical

Un radical es una molécula con número impar de electrones. En su mayoría, estas sustancias son altamente reactivas, ya que el electrón desapareado tiende a formar un enlace covalente con un electrón desapareado de otra molécula. Un ejemplo es el radical hidroxilo (OH^*). [5]

El radical hidroxilo (OH^*) es considerado un “detergente” para la atmósfera. Tiene la capacidad de oxidar y mineralizar casi cualquier molécula orgánica produciendo agua, dióxido de carbono e iones inorgánicos. [6]

2.3. Fotocatálisis heterogénea

La fotocatálisis heterogénea (FH) [4][7] es una técnica de eliminación de contaminantes en aguas con potencial uso para el tratamiento de contaminantes orgánicos. Consiste en la utilización de un semiconductor para absorber luz y convertirla en portadores de carga (electrones y huecos) que permiten la obtención de especies reactivas de oxígeno (ROS), como por ejemplo el radical OH^* . El proceso completo, como se detalla en la figura 1, consiste en la absorción de un fotón de energía $h\nu$ mayor a la energía de gap del semiconductor, luego los portadores foto generados difunden hacia la superficie del fotocatalizador donde los huecos reaccionan con moléculas de agua adsorbidas para generar radicales hidroxilos y los electrones pueden reducir oxígeno molecular para generar aniones superóxido, mientras que los electrones reaccionan con los contaminantes orgánicos degradándolos hasta, en las mejores condiciones, la mineralización de los mismos.

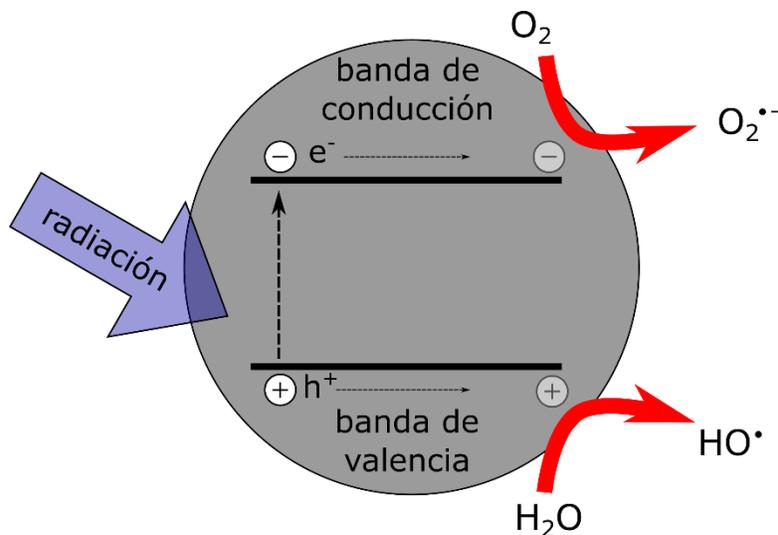


Figura 1: Esquema del proceso de generación de especies reactivas mediante la absorción de radiación en un fotocatalizador. e^- y h^+ representan al electrón y al hueco respectivamente, que se forman en las bandas de conducción y valencia ante la absorción de un fotón

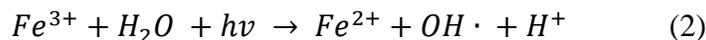
Uno de los caminos de implementación de la FH es el uso de nanopartículas, que al proporcionar una mayor superficie de contacto, generan la ventaja de tratar una mayor parte de la solución. Una forma de lograr este cometido es utilizando catalizadores basados en nanopartículas magnéticas, por ejemplo, las nanopartículas de estructura tipo core-shell $Fe_3O_4@TiO_2$.

2.4. Foto-Fenton

El proceso foto-Fenton se basa en la reacción de peróxidos (generalmente agua oxigenada- H_2O_2) con iones de hierro, para obtener especies de oxígeno reactivas, tal como el radical hidroxilo [7]. Una ventaja de este proceso es que el agua oxigenada y el hierro, responsables de dar origen a la reacción, son económicos, de fácil manejo, seguros y de poco riesgo ambiental. [3]

Las nanopartículas de Fe_3O_4 pueden experimentar un proceso de foto reducción [4], en el cual el $Fe(III)$ superficial reacciona con los fotones generando $Fe(II)$ soluble y radicales hidroxilo. Luego, el $Fe(II)$ se oxida a $Fe(III)$, degradando el agua oxigenada para formar radicales hidroxilo (ecuación 1). Se hace uso de luz, en el rango espectral entre 200 y 500 nanómetros, para lograr una foto reducción de $Fe(II)$ a $Fe(III)$, en otras palabras, para aumentar el poder de oxidación. En consecuencia se producen más radicales hidroxilo

(ecuación 2). Posteriormente, los radicales generados oxidan a la molécula orgánica contaminante, generando distintos productos de degradación. Eventualmente, el proceso puede alcanzar la mineralización completa (ecuación 3) [8].



2.5. Reactores

Para la implementación de los materiales de la sección 2.4 de forma sistemática es necesaria la instrumentación de un banco de pruebas o reactor, que permitiría determinar las condiciones de diseño para ampliar la escala de tratamientos. Algunos de los diseños posibles de reactores para fotocatalizadores magnéticos son los siguientes:

2.5.1. Reactor de lecho empacado rotatorio [9]

Se trata de un reactor con movimiento rotacional (figura 2). Se coloca el agua en el tanque de almacenamiento o *storage tank*, que cuenta con un agitador (*stirrer*) y una bomba aireadora (*aeration pump*). Junto con ella se coloca el catalizador, $Fe_3O_4@PbS@Ni_2P$, para que se diluya. El agua se bombea hacia el reactor, el cual está hecho de cuarzo. Allí se encuentra un distribuidor desde donde se emana la solución sobre unas planchas armadas a base de mallas de alambre de acero inoxidable. Las mismas rotan en torno a un eje haciendo uso de poleas y un motor que rota entre 300 y 1700 rpm. La luz ultravioleta es suministrada desde el exterior y desde el interior. Por gravedad se extrae el agua y se devuelve al tanque de almacenamiento. Este sistema cuenta con un medidor de caudal del agua bombeada, una apertura para tomar muestras del proceso y una vía extra para vaciar el reactor por efecto de gravedad. No cuenta con etapas de separación de agua y catalizador. La ventaja de las planchas es que son económicas, de fácil manejo y seguras comparadas con otros dispositivos convencionales.

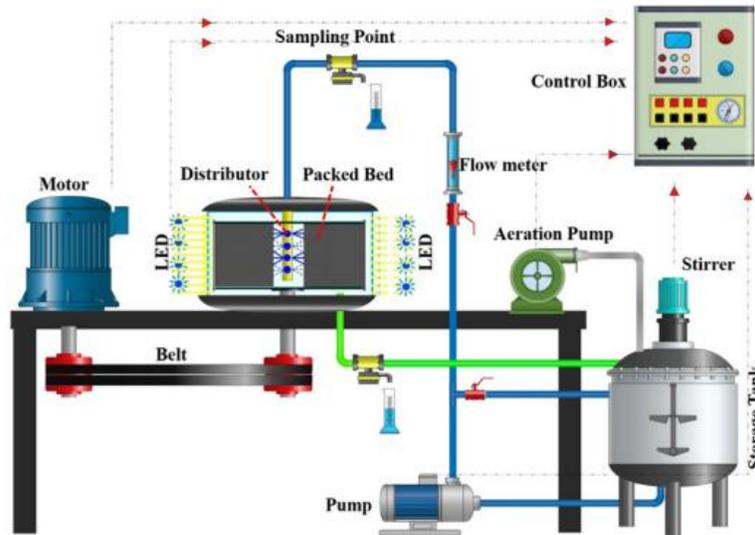


Figura 2: Esquema del reactor de lecho empacado rotatorio propuesto por Mosleh et. al

2.5.2. Reactor secuencial [10]

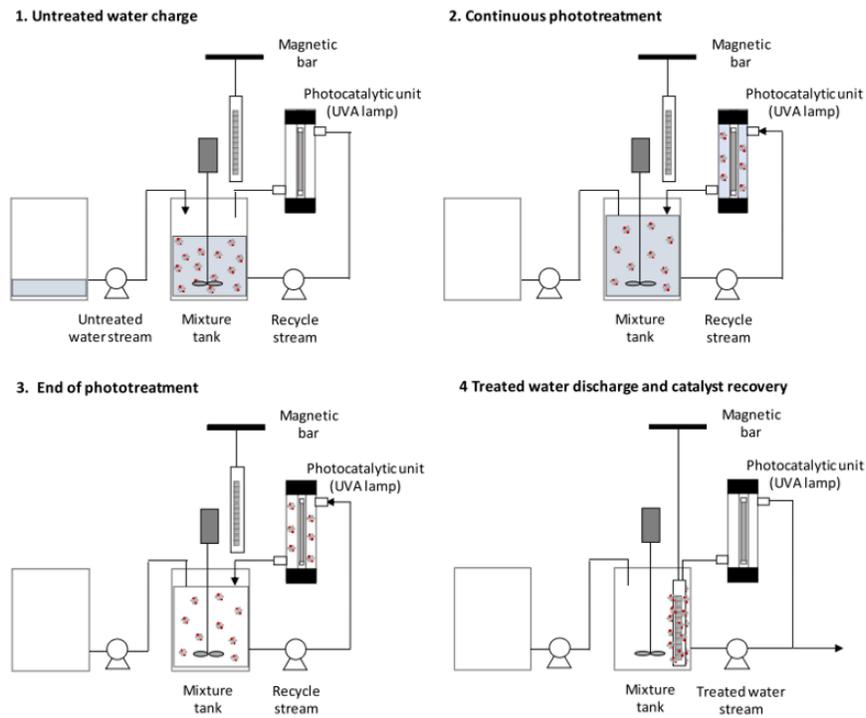


Figura 3: Esquema del reactor secuencial propuesto por Fernandez et. al

El reactor secuencial opera siguiendo los pasos descritos en la figura 3. Paso 1: Se coloca el agua a tratar en el recipiente de la izquierda. Luego se la bombea hacia el tanque mezclador (*mixture tank*) y donde se mezcla con el catalizador $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ con el agua. Paso 2: Proceso de recirculado hacia un tercer recipiente donde se le irradia luz UV para el tratamiento. Paso 3: Terminado el tratamiento, es necesario separar el catalizador del agua tratada. A tal fin se introduce una barra magnética y se atrae al catalizador. La desventaja es la necesidad de un sistema mecánico para la extracción de las nanopartículas, y al ser un imán permanente será difícil volver a liberar las partículas a la solución.

2.5.3. Reactor de lecho fijo con membranas de separación magnética [11]

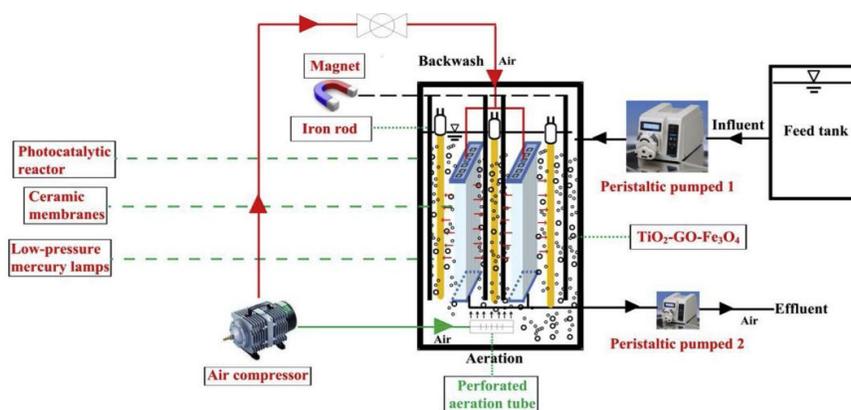


Figura 4: Esquema del reactor de lecho fijo con membranas de separación magnética propuesto por Li, et. Al.

El modelo de Li, et. al (figura 4) propone colocar el agua a tratar en un recipiente externo. A través de una bomba peristáltica se la hace ingresar al reactor. Allí se encuentra el catalizador. Mediante un sistema de aireadores se previene que se concentre el catalizador, se mantienen limpias las membranas cerámicas, y se hace recircular la solución a tratar. Durante el recirculado se emite luz ultravioleta con lámparas de mercurio, dando origen a la fotocátalisis. Realizado el tratamiento, se acerca un imán a unas barras de hierro que atraen al catalizador. Por último se activa la segunda bomba peristáltica, que crea una diferencia de presión, haciendo que el agua atraviese la membrana cerámica y quedando el catalizador que no fue atraído por el campo magnético dentro del reactor.

3. Hardware/Aspectos constructivos

3.1. Diseño de un reactor foto catalítico de separación magnética

Para el diseño del reactor se buscó integrar la capacidad de recuperación de las nanopartículas con una implementación que fuera fácilmente escalable. Por esto se optó en por un diseño secuencial como el propuesto por Fernández et. Al (ver sección 2.5.2)

En la figura 5 se presenta un esquema del reactor en donde se pueden identificar distintas partes. En el reservorio de control (1) se coloca el agua a tratar en conjunto con el catalizador. La bomba peristáltica (2) es utilizada para mover el fluido a través de la máquina. La reacción de tratamiento sucede en el reactor (3), que se encuentra dentro de la camisa de LEDs (4). El electroimán (5) separa el catalizador del agua tratada. Con la electroválvula (6) es posible direccionar el sentido de flujo del agua para que recircule o que sea expulsada del reactor.

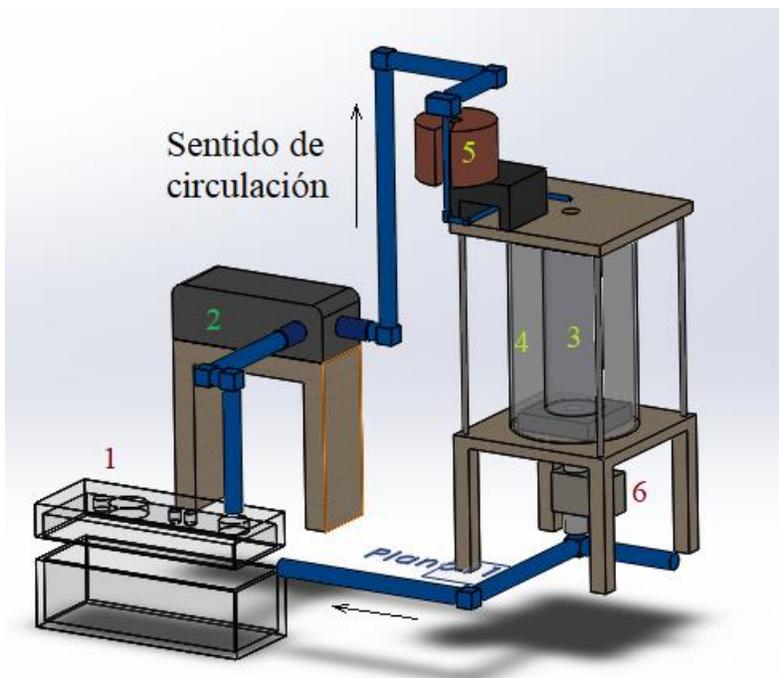


Figura 5: Esquema del reactor foto catalítico. 1-Reservorio de control. 2-Bomba peristáltica. 3-Reactor. 4-Camisa de LEDs. 5-Electroimán. 6-Electroválvula.

3.2. Implementación

En las figuras 6 y 7 se muestra el prototipo implementado. A diferencia del esquema de la figura 5, no se incorporó la electroválvula debido a que no fue posible adquirir una compatible con las dimensiones de las mangueras de la bomba peristáltica, por lo que en el prototipo final el agua solo recircula. La diferencia con la idea de funcionamiento original es que en vez de extraer el agua tratada en un segundo recipiente, se obtiene la misma en el recipiente original/reservorio de control. Sin embargo, el algoritmo implementado considera el prototipo de la figura 5. En el caso de adquirir una electroválvula acorde a las características necesarias, simplemente habría que conectarla para que el sistema funcione de la forma deseada.

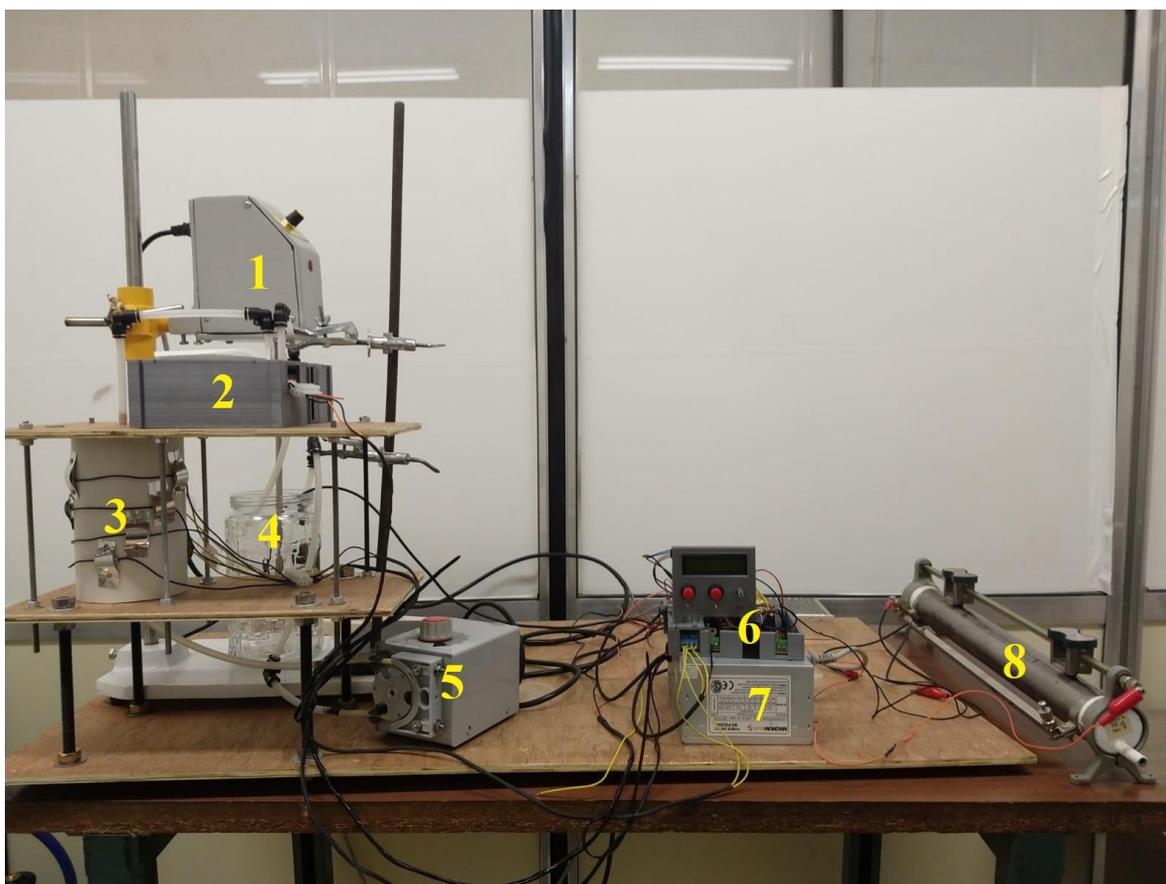


Figura 6: Vista frontal del prototipo. 1-Agitador. 2- Electroimán. 3- Camisa de LEDs. 4-Reservorio de control. 5-Bomba peristáltica. 6-Sistema de control. 7-Fuente de alimentación del sistema de control y LEDs. 8-Resistencia de regulación de corriente del electroimán.

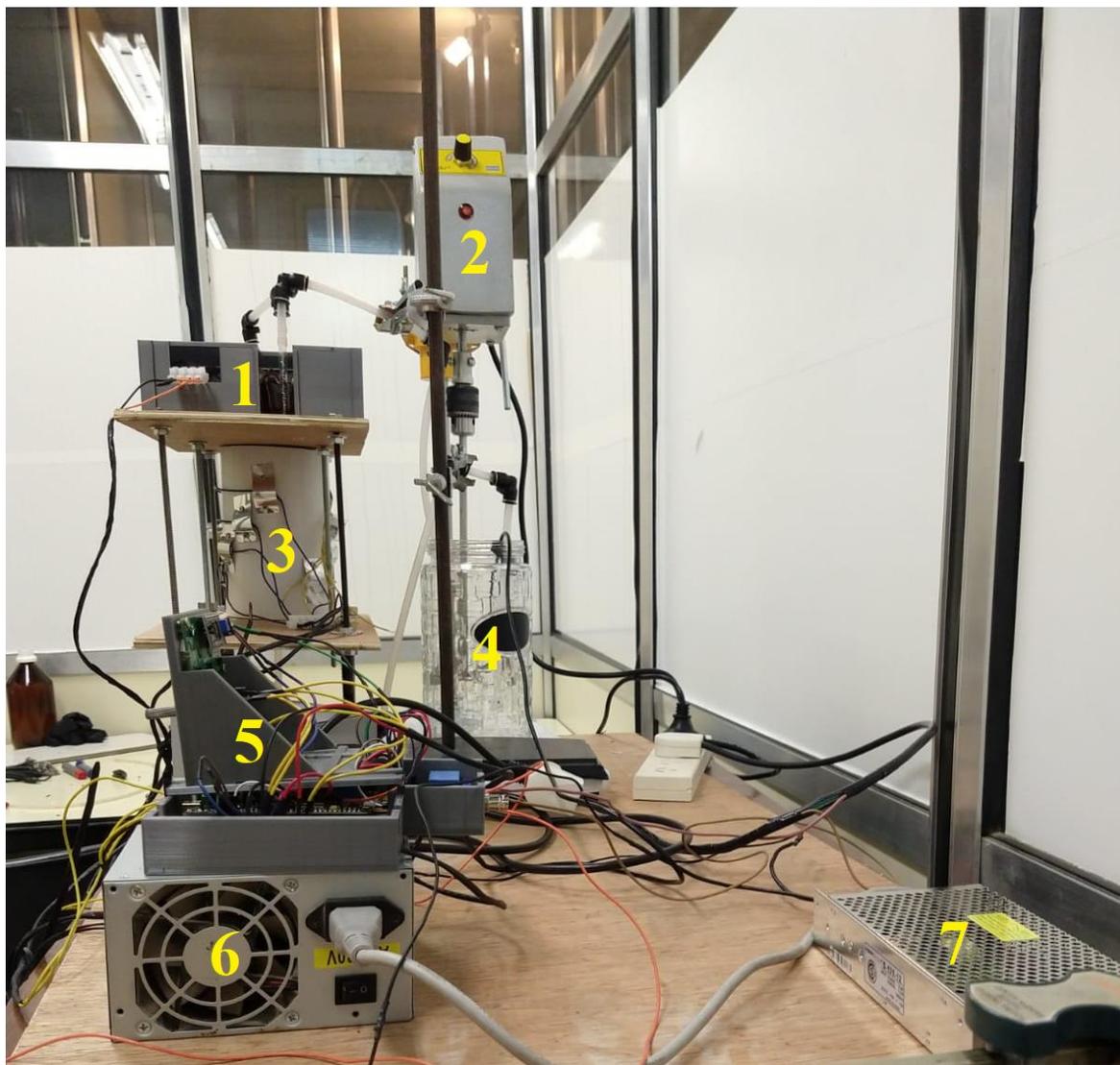


Figura 7: Vista lateral del prototipo. 1-Electroimán. 2-Agitador. 3-Camisa de LEDs. 4-Reservorio de control. 5-Sistema de control. 6-Fuente de alimentación del sistema de control y LEDs. 7-Fuente de alimentación del electroimán.

3.3. Hardware Utilizado

El sistema está conformado por dos microcontroladores. Uno, un Arduino Nano que manipula todos los componentes del reactor. El segundo es un NodeMCU, que se encarga de enviar la información obtenida al servidor web y distintos periféricos necesarios para la operación. La figura 8 contiene un diagrama en bloques de lo que comprende a la parte de control del prototipo. Allí se aprecian de forma clara las entradas y salidas.

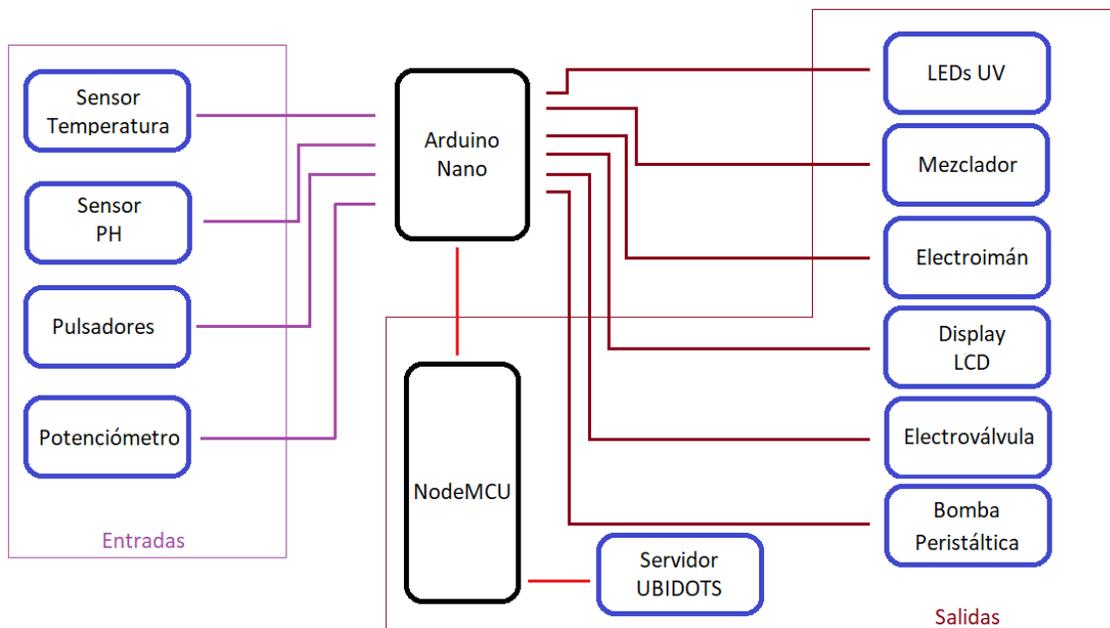


Figura 8: Diagrama en bloques del hardware implementado, con el detalle de las entradas y salidas.

3.3.1. Placa Arduino Nano

La placa Arduino Nano [12] es popularmente conocida por su gran compatibilidad con diferentes sensores y periféricos, por su bajo consumo energético y su bajo costo de adquisición. Arduino cuenta con su propia interfaz de programación y compilación, Arduino IDE, desde la cual es posible incluir diferentes librerías de código abierto. Las librerías están disponibles para hacer uso de ellas, modificarlas o extraer ideas para programación en general. Esto permite que los diferentes usuarios puedan ir adaptando el software con el transcurso del tiempo.

La placa cuenta con 30 pines, entre los que se destacan 8 entradas analógicas, 14 entradas digitales, un pin de salida de 3,3 Volt, entre otros. Las entradas analógicas y digitales pueden ser configuradas como entradas o salidas según lo deseado. Esto abre un gran abanico de posibilidades a la hora de conectar periféricos.

La placa se alimenta con una tensión de 5V, idéntica a la alimentación de los teléfonos móviles, o algunos puertos de alimentación de las *motherboards*.

El microcontrolador que utiliza la placa es el ATMEGA328P, que opera con una tensión de alimentación de entre 7 y 12 Volt. La frecuencia de trabajo de este procesador es de 16 MHz.

Los protocolos de comunicación a disposición son I2C, SPI y UART.

En la figura 9 se puede apreciar el Pinout:

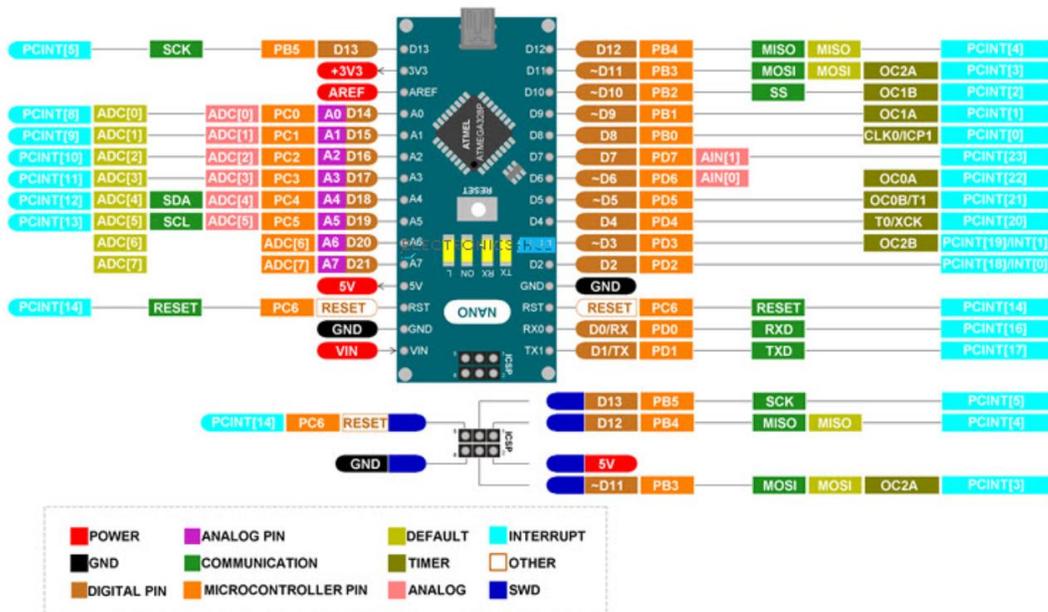


Figura 9: Pinout del Arduino Nano [12]

3.3.2. Placa NodeMCU ESP-12E

Este dispositivo [13] lleva montado una placa ESP8266 que funciona como un módulo de WiFi que le permite a un microcontrolador tener un enlace a internet a través del protocolo TCP/IP (estándar para las comunicaciones a través de internet).

NodeMCU es una placa de desarrollo para proyectos con implementación IoT (*Internet of Things*). Cuenta con 17 pines, entre los cuales hay 11 configurables como entradas o salidas digitales, un pin de entrada analógica, 4 pines con soporte para salida PWM, 2 pares para comunicación UART, y soporte para protocolo de comunicación SPI e I2C.

En la figura 10 se muestra el pinout:

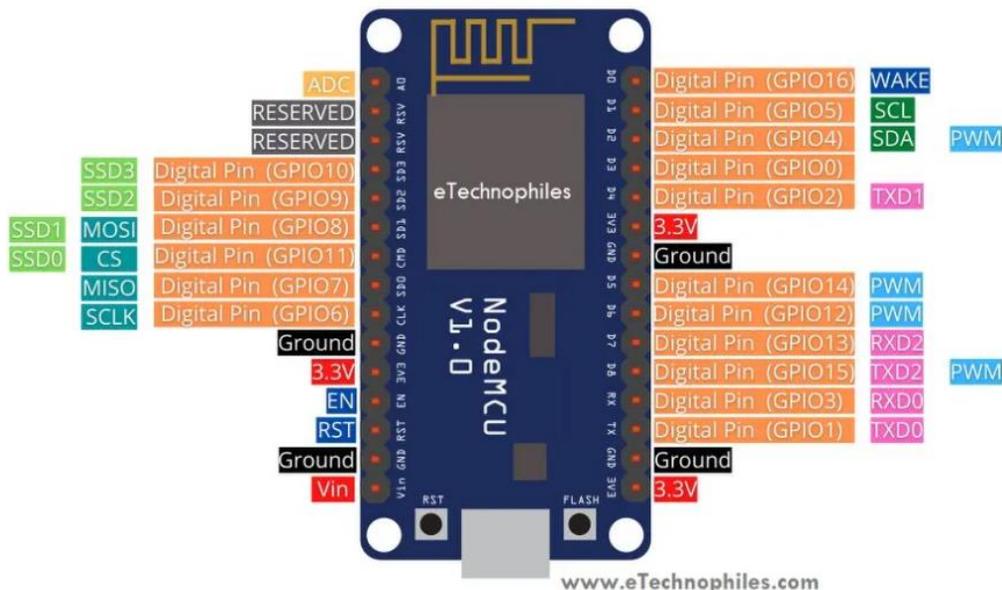


Figura 10: Pinout del NodeMCU [13]

3.3.3. Elección de los microcontroladores

La placa de Arduino fue concebida como un microcontrolador, es decir, con gran capacidad de manejo de periféricos pero sin tener una gran capacidad de procesamiento de datos. Por esta razón es que cuenta con una gran cantidad de pines de entrada/salida analógicos y digitales, compatibilidad con varios protocolos de comunicación y 5 pines que cuentan con módulos PWM capaces de funcionar de forma independiente (se configura la salida y mientras el algoritmo realiza otras tareas, la señal de PWM no se ve interrumpida).

Por el contrario, NodeMCU es una placa que tiene un módulo WiFi, y que también puede officiar de microcontrolador. Sin embargo, no tiene tantas cualidades para el manejo de periféricos como su par de Arduino.

Se hizo uso del Arduino Nano debido a que cuenta con muchas características necesarias para officiar de “cerebro” del reactor:

- sencillez para encontrar periféricos compatibles y sus respectivas librerías (para controlarlos u obtener los datos recibidos).
- cantidad suficiente de entradas y salidas analógicas y digitales.

- gran compatibilidad de protocolos de comunicación.
- capacidad de implementar interrupciones de código.
- Existe un gran soporte de información en internet

Por su parte, NodeMCU no cuenta con la cantidad necesaria de pines analógicos para el control del reactor, y es necesario adaptar las librerías disponibles para que funcionen los mismos periféricos que en el Nano. Se hizo uso del NodeMCU por su principal característica, su placa de WiFi que permite enviar datos a un servidor Web, en específico, los valores de temperatura y PH medidos, así como también el estado en el que se encuentra el reactor.

3.4. Periféricos:

3.4.1. Sensor PH

El sensor de PH que se utiliza es el módulo PH-4502C, con la sonda electrodo E201, conector BNC.

En la tabla 1 se presentan los datos del módulo:

	PH-4502C
Voltaje de operación	5 [V]
Corriente	5-10 [mA]
Rango de detección	0-14 [PH]
Temperatura de operación	-10 / 50 [C]
Precisión	+/- 0,1 PH (a 25 C)

Tabla 1: Propiedades del sensor de PH-4502C

El módulo tiene una salida analógica en la cual PH=14 equivale a 5 Volt y PH=0 a 0 Volt. Para hacer la conversión de los datos leídos, a la lectura de tensión se la multiplica por 0,013; lo que equivale a la escala 14 PH/1023 niveles de tensión.

Este sensor cuenta con dos potenciómetros. Uno se utiliza para ajustar un valor de borde de PH, el cual hace que un LED integrado se encienda si lo medido arroja una magnitud superior.

El segundo potenciómetro se utiliza para ajustar el offset, debido a que este tipo de dispositivos suelen descalibrarse. La calibración se realiza haciendo uso de *Buffers*.



Figura 11: Módulo sensor de PH-4502C [14]

3.4.2. Sensor de temperatura

Se utilizó un sensor DS18B20 EM1-5603. Este es una termocupla, que necesita una resistencia *Pull-Up* de 4,7 Kilo Ohm en el hilo de comunicación para funcionar. Tiene un cable de tres hilos, de los cuales dos están dedicados a alimentación y un tercero para el envío de datos en código digital. En la tabla 2 se presentan sus principales características.

	DS18B20 EM1-5603
Voltaje de operación	3-5,5 [Volt]
Rango de detección	-55 – 125 [C]
Precisión (-10 a 85 C)	0,5 [C]

Tabla 2: Propiedades del sensor de temperatura:



Figura 12: Sensor de temperatura

3.4.3. Relay arduino

La placa tiene tres pines, dos para alimentación y una para la señal de operación. Debe alimentarse con 5 Volt y una corriente entre 50 y 60 mili Ampere. Una señal nivel bajo energiza el relay mientras que una de nivel alto lo desenergiza.

3.4.4. Electroimán

La separación del fotocatalizador del agua es una de las principales tareas que el prototipo debe realizar. No solo para poder reutilizar el fotocatalizador, sino también por la contaminación que podría generar si se liberara en un efluente.

En la búsqueda para lograr la separación de la solución, se analizaron las propiedades de las nanopartículas de Fe_3O_4 para poder identificar distintas alternativas que permitan cumplir con el propósito. Luego de varios ensayos con imanes de diferentes intensidades, se llegó a la conclusión de que era necesario contar con un campo de alrededor de un décimo de Tesla, una magnitud significativa (puede variar conforme al catalizador). Lo que a su vez, dio origen a una nueva incógnita: el tipo de imán a utilizarse.

Bajo la perspectiva de que el producto final tenga la mayor vida útil posible y la mayor flexibilidad, se optó por utilizar un electroimán. Un imán permanente de características similares a las necesarias implicaba fabricar una etapa de movimiento de alguna parte del prototipo, ya que el campo magnético es necesario sólo en algunos momentos del tratamiento.

En consecuencia, habría que lidiar con el desgaste de las partes mecánicas que ocurre en el paso del tiempo.

Un electroimán tiene la ventaja de que el mantenimiento que necesita es prácticamente nulo, y evita el uso de partes móviles. Hay que considerar que en el diseño del tratamiento que se presenta puede quedar una remanencia de campo al desenergizarlo. Sin embargo, la mayoría de los catalizadores no son muy permeables y este efecto puede considerarse imperceptible. Un electroimán también tiene la ventaja de lograr una fácil recuperación del catalizador. En el peor de los casos, al no emitir más campo magnético, sólo es necesario aguardar un tiempo para que el proceso de histéresis finalice y se separe el catalizador del electroimán.

Considerando el análisis de una bobina [15], es posible definir la intensidad de campo magnético en el núcleo como:

$$\mathbf{H} = \frac{N \cdot I}{2 \cdot a} \quad \left[\frac{\text{Ampere}}{\text{Metro}} \right] \quad (4)$$

A la densidad de flujo magnético se la calcula como:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot a} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad [\text{Tesla}] \quad (5)$$

Donde:

- μ_0 : permeabilidad magnética del material dentro del bobinado. En este caso particular, el aire.
- N: Cantidad de espiras de la bobina.
- I: Corriente que circula por la bobina.
- a: radio de la circunferencia de la bobina.

Teniendo un valor aproximado de la densidad de flujo necesaria para la aplicación, resulta fácil hacer una estimación de los parámetros necesarios para el armado del electroimán. Es relevante tener en mente que las fórmulas parten de un modelo ideal, donde se ignoran muchos fenómenos físicos que dependen de las propiedades del material y que pueden generar pérdidas de energía o de intensidad de campo magnético.

La permeabilidad magnética explica cuan fácil es reorientar los electrones de un material en el sentido de un campo magnético. Si los valores de campo son bajos, se cumple la relación lineal de que la *densidad de flujo magnético* es igual a la *permeabilidad magnética* por la *intensidad de campo magnético* (ecuación 5).

En el rango de valores al que se necesita exponer el material que oficia de núcleo de la bobina, la relación lineal entre **B** y **H** puede perderse, lo que se debe a que el material llega al punto de saturación [16]. En otras palabras, no cuenta con una infinidad de electrones disponibles para una reorientación, por lo que la densidad de flujo magnético no puede ser infinita. Este efecto se ilustra de forma simplificada en la figura 13.

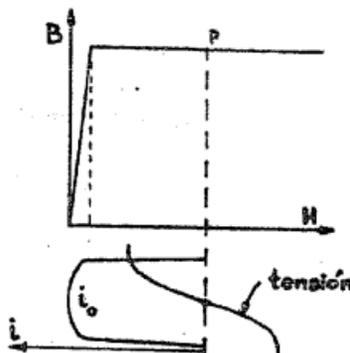


Figura 13: Gráfico H vs B, que ilustra las propiedades de permeabilidad magnética del material [16]

Se hicieron distintos ensayos de armado de electroimanes para tratar de atraer al fotocatalizador sin obtener los resultados deseados. La solución finalmente adoptada se basó en un transformador de medición. Cabe aclarar que la principal diferencia entre transformadores es la conformación del núcleo. La permeabilidad, la pureza del material, las dimensiones, determinan el comportamiento que tendrá el mismo. En este caso particular, al ser un núcleo de transformador de medición, las pérdidas de potencia son muy bajas. El núcleo es laminado para evitar las corrientes parásitas o de Foucault, la corriente de imantación es muy baja, y la permeabilidad magnética es alta. Todos estos elementos en conjunto dan origen a que un gran porcentaje de potencia entregada se convierta en flujo magnético.

Originalmente, el núcleo del transformador contaba con un solo bobinado de 64 vueltas. Continuando el sentido, se lo bobinó hasta obtener aproximadamente 400.

Según norma se permiten hasta 5 Amperes para evitar el sobrecalentamiento de los cables por efecto Joule. Es necesario estar debajo de estos valores y que el barniz no se derrita para que la bobina no entre en cortocircuito.

La mínima sección de cable de la bobina es de 1 mm². Experimentalmente quedó comprobado que con una corriente de 4 ampere el catalizador se ve atraído y que no hay un sobrecalentamiento, por lo que bajo estas condiciones el sistema opera de forma segura.

Al diseñar la alimentación del electroimán debe tenerse en cuenta que, al tratarse de una bobina, el circuito eléctrico se comporta como un filtro de baja frecuencia o un circuito integrador. Como este circuito se controla a través de un relay, el transitorio al alimentar el inductor puede provocar que la fuente de alimentación se quemé. Es necesario estimar los parámetros del electroimán para determinar su comportamiento al energizarlo. En primer lugar se estimó el circuito equivalente a través del medidor “FLUKE PM6303A”, un medidor automático para la caracterización de circuitos mediante el cual se estiman los parámetros inductivos, capacitivos y resistivos. Para hacer la medición, emite una señal de frecuencia de 1 KHz. Los resultados obtenidos de este ensayo fueron:

- Inductancia: 25,67 mH.
- Resistividad: 9,3 Ohm.
- Módulo de impedancia: 161,5.
- Fase de la impedancia: 86,7°.
- Factor Z (relación inductancia/resistividad): 17,3.

Para el uso a la que está destinada la bobina, el ensayo fue útil para una primera estimación de las magnitudes. Durante la implementación se observa que la resistividad de la bobina era menor, ya que el estímulo que recibe se lo puede asemejar a un escalón de tensión y no a una frecuencia de 1 KHz. Se la midió entonces haciendo uso de un puente de Wheastone. La cifra obtenida fue de 0,56 Ohm.

El circuito de alimentación para el electroimán se presenta en la figura 14:



Figura 14: Circuito de alimentación del electroimán

Bajo estas condiciones, es posible describir la función de transferencia del electroimán como:

$$B(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = s * L \quad (6)$$

Por temas de simplicidad del circuito y facilidad de identificación de fallas, la rama es controlada por un relay, como se muestra en la figura 15:

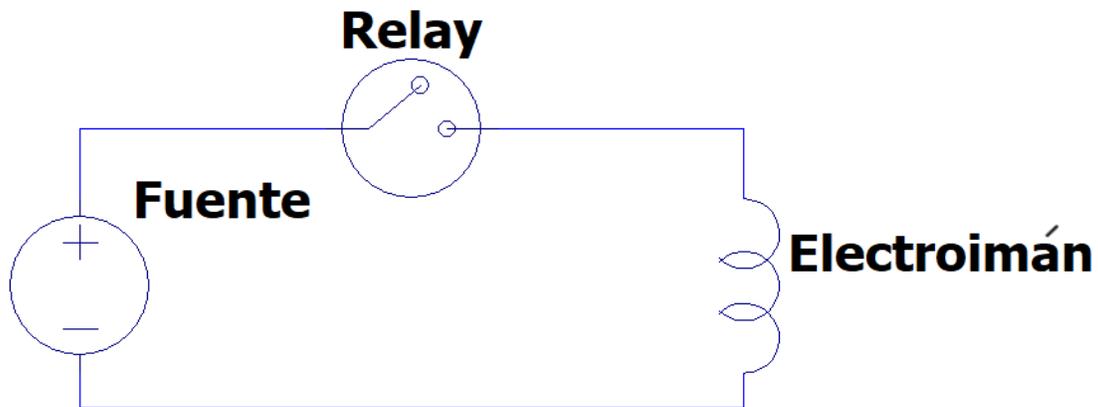


Figura 15: Circuito de alimentación del electroimán

Como es un relay el que cierra el circuito, puede considerarse a la tensión como un escalón. Acorde a la teoría de control, la respuesta del circuito ante el mismo hace que el transitorio adquiera valores de pico muy elevados. Si la fuente de energía no tiene protecciones, la misma puede dañarse. La solución a este inconveniente es colocar capacitores en paralelo, como se muestra en la figura 16 (con el fin de simplificar la lectura del circuito, se representan los capacitores con uno sólo).

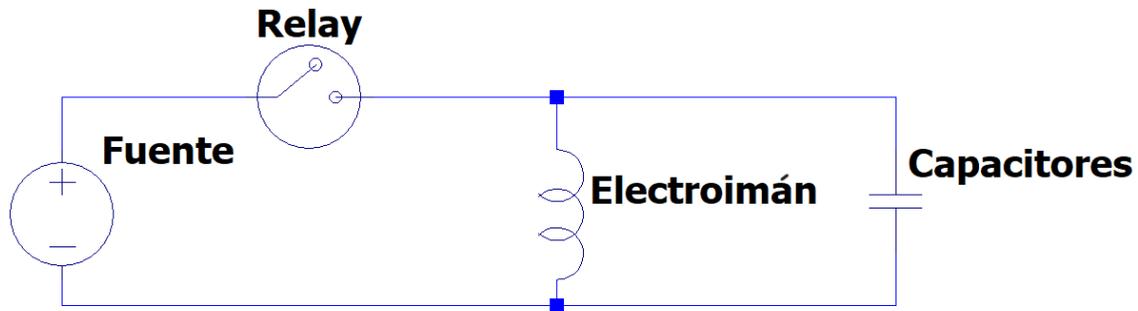


Figura 16: Circuito de alimentación del electroimán

Al estar los capacitores en paralelo, estos atenúan el pico del transitorio y en el estado estacionario no afectan a la bobina. Fue representada la resistencia de la bobina del electroimán como una resistencia en serie con una bobina ideal, y a los capacitores se los consideró ideales. Ver figura 17.

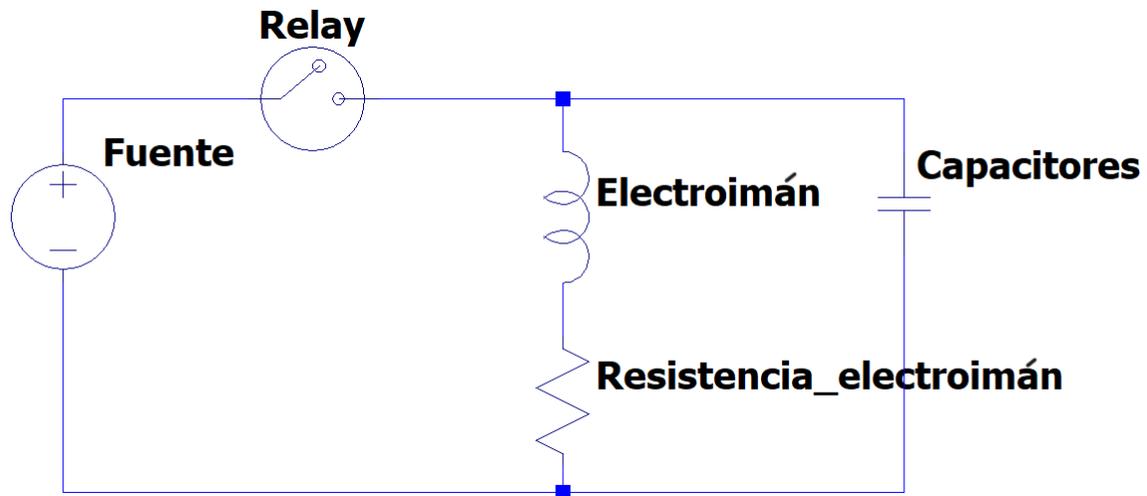


Figura 17: Circuito de alimentación del electroimán

La función teórica de transferencia considerando la tensión de la fuente sobre la corriente que entrega es la siguiente:

$$H(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = \frac{R+sL}{1+RCs+LCs^2} \quad (7)$$

Por teorema del valor final [17], es posible encontrar la respuesta de la función de transferencia durante el estado estacionario:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) * u(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot H(s) \cdot \frac{1}{s} \quad (8)$$

Reemplazando las expresiones:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot H(s) \cdot \frac{1}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{R+sL}{1+RCs+LCs^2} = R \quad (9)$$

En el estado estacionario, la carga desde el punto de vista de la fuente es el valor de la resistencia interna de la bobina. La fuente debe suministrarle a esta impedancia, de 0,56 Ohm, los 3 ampere necesarios para la atracción del catalizador.

Se armó un arreglo de capacitores conectados en paralelo al electroimán y que a su vez no ocuparan un volumen tan significativo, llegando a una capacitancia equivalente de 9,2 mF. Mediante un script en MATLAB, se hizo la simulación de comportamiento del circuito para analizar la respuesta al escalón que se presenta en la figura 18.

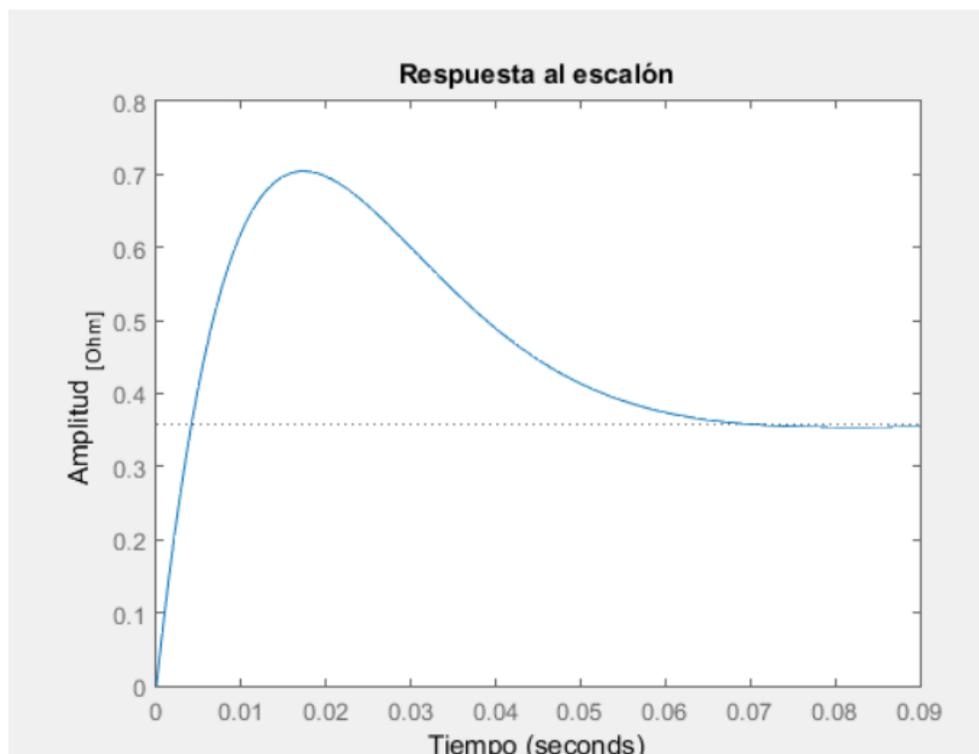


Figura 18: Respuesta teórica al escalón del circuito RLC del electroimán

Observando con detenimiento la figura 18, es posible analizar la dinámica del transitorio del circuito. Si bien la unidad de la amplitud de la respuesta al escalón es el Ohm, lo que

representa es la relación entre la corriente y tensión que provee la fuente. Se observa que al energizar instantáneamente el electroimán en paralelo con la batería de capacitores, por efecto de la bobina, se presenta una oposición al paso de corriente, que demanda una mayor potencia de parte de la fuente para vencer el contra efecto. En el caso de que solo estuviera la bobina conectada, la amplitud de la respuesta alcanzaría un valor infinito según indica la teoría. El modelo entonces reduce el efecto de la bobina sobre la fuente, atenuando el valor máximo de la amplitud de la respuesta.

Para poder entregarle la corriente necesaria al circuito, se utilizó, en el armado del circuito final, una fuente switching de 110 Watts conectada con una resistencia variable de alta potencia.

3.4.5. Radiación UV

La energía necesaria para que la reacción Fenton ocurra se obtiene a partir de radiación correspondiente a longitudes de onda menores a los 500 nm, de lo contrario no es posible para los electrones superar la energía de gap [2]. Debido a la energía necesaria para dar origen a la reacción, se optó por LEDs de potencia de 385 nanómetros de longitud de onda. Los mismos tienen un consumo de 3 Watts y una caída de tensión nominal de 3,4 Volts a 0,7 Ampere. En condiciones de operación, la temperatura que pueden alcanzar es considerable, alrededor de 70 grados Celsius. Por esto se diseñó un sistema para disipar el calor y evitar riesgos de incendio.

Los LEDs utilizados se muestran en la figura 19. Como se puede observar, el LED se encuentra soldado sobre una estrella disipadora de calor.

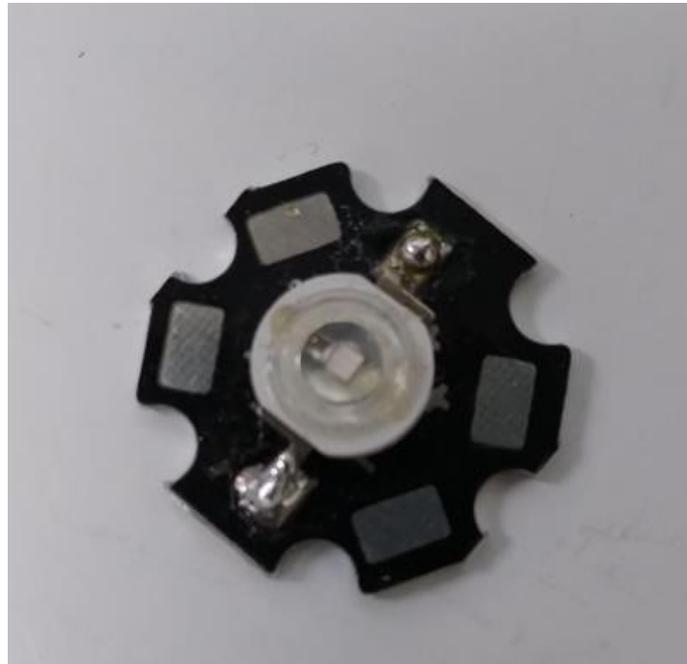


Figura 19: LED UV

El reactor cuenta con una estructura que sostiene los LEDs es un caño plástico (PVC) con agujeros. La forma en la que se fijaron es apretándolos contra el caño con pads térmicos y láminas de aluminio, conformando una camisa de LEDs (en la figura 20 se muestra un esquema de la estructura que soporta a los LEDs rodeando al reactor, el tubo de vidrio).

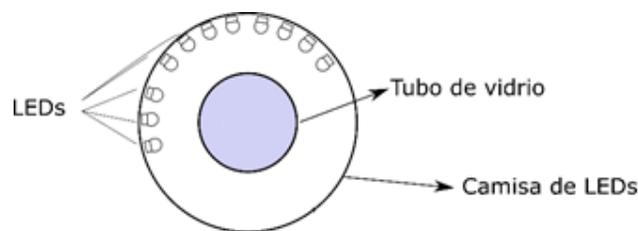


Figura 20: Diagrama de camisa de LEDs

Los pads térmicos son pequeñas almohadillas con una capacidad de 5 W/mK (Watts por metro Kelvin) de disipación térmica y no son conductoras eléctricas. Estas se utilizan mayormente en las computadoras para disipar el calor de los procesadores de PC. Dado que la temperatura que alcanzan estos últimos puede llegar en casos extremos a temperaturas cercanas a 100 °C, se optó por colocarlas entre estos y las hojas de aluminio para evitar un

cortocircuito. De esta manera quedan fijos los LEDs a la estructura, aislados eléctricamente y con una capacidad de disipación de calor suficiente, ver figura 21.

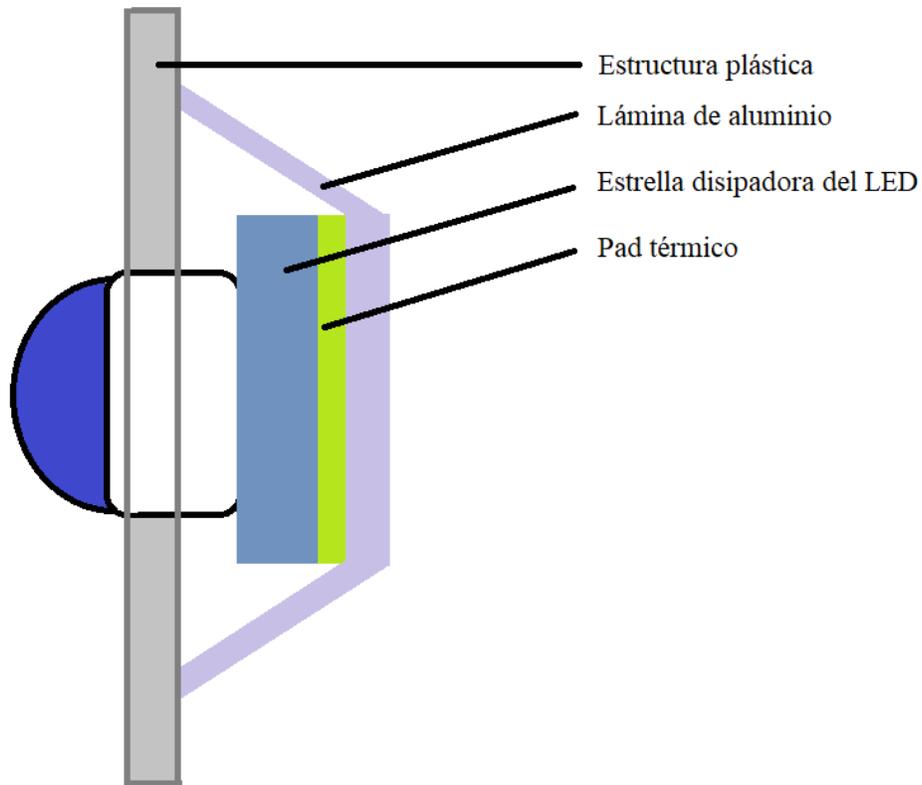


Figura 21: Diagrama de sujeción de LEDs

Para armar el circuito electrónico de alimentación y fijar una corriente cercana a la nominal de 700 mili Ampere, se implementó el circuito de la figura 22.

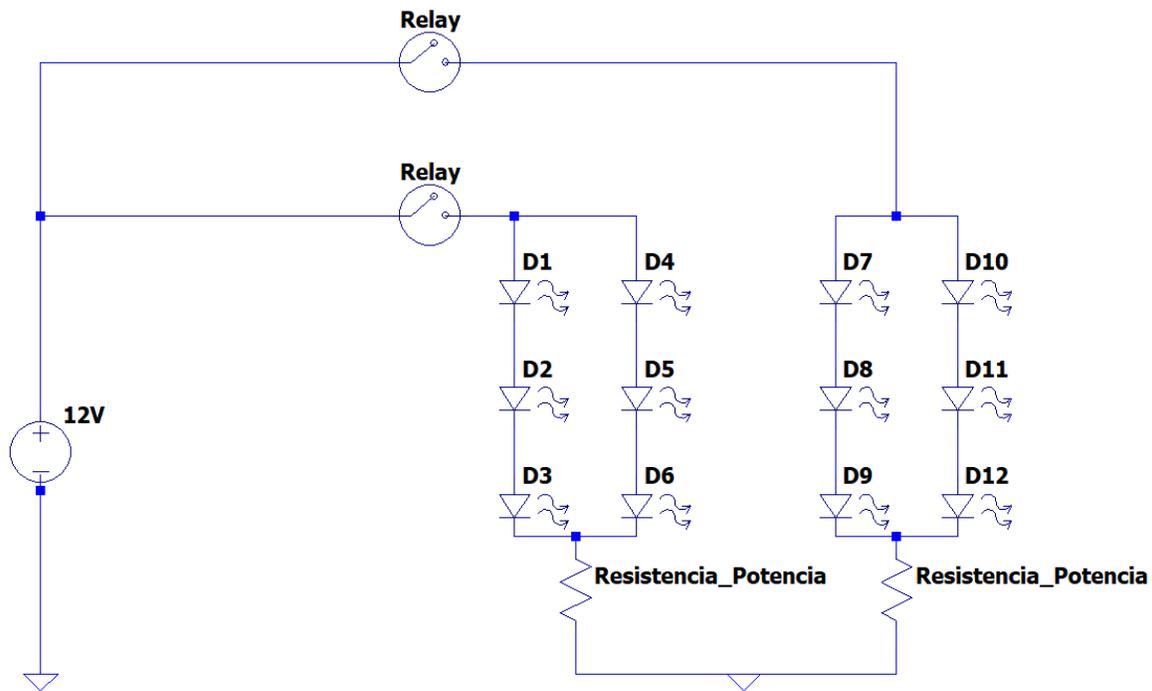


Figura 22: Circuito implementado de la disposición de los LEDs

Los Relays abren o cierran las ramas y de esta forma se emite luz. El valor establecido para las resistencias de potencia cerámicas es de 1.33 Ohm, que permite que circulen aproximadamente 650 mili Ampere por cada LED.

3.4.6. Agitador

Se preparó un circuito para implementar un agitador basado en un ventilador o cooler de una fuente conmutada de PC. Para mantener el catalizador disperso en el agua, se agita de forma permanente el contenido del reservorio de control. Se buscó que este componente tenga una opción de ajuste de RPM, tal como ocurre en los agitadores utilizados en los laboratorios de investigación. Al ser el motor de corriente continua, se lo controla por pulsos del tipo PWM.

Para aislar al microcontrolador del circuito de alimentación de la turbina, se hace uso de una compuerta *OR*. La ventaja de hacer uso de este tipo de compuerta es que su alimentación es de 5 Volts, con un bajo consumo; y su tecnología tolera el ancho de banda con el que trabaja el módulo PWM del Arduino. La salida de esta compuerta está conectada a la base de un transistor que trabaja en las zonas de corte y saturación conforme la señal de excitación. (Ver figura 23)

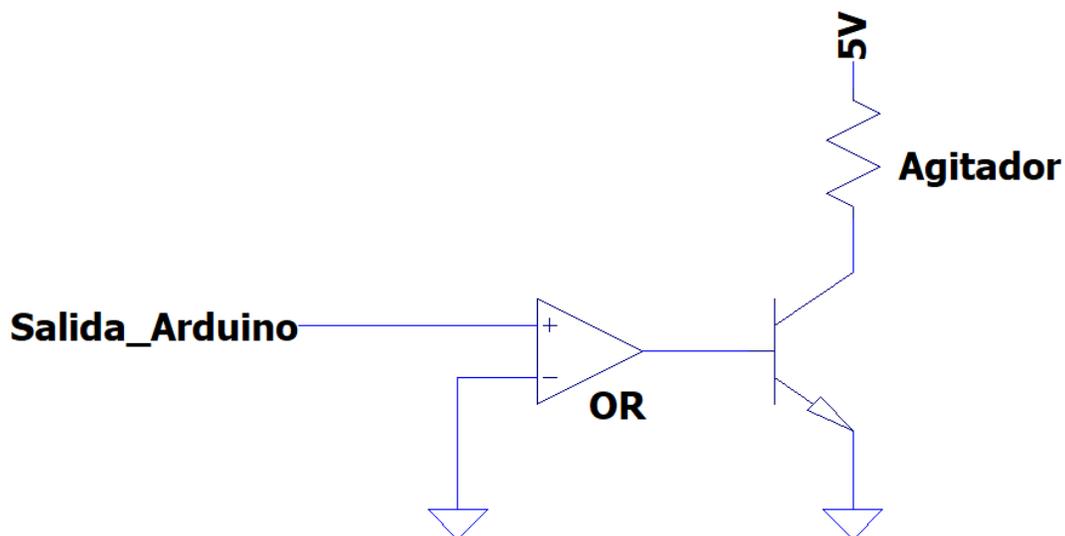


Figura 23: esquema de control del agitador

La implementación de esta solución probó experimentalmente no ser la más óptima. El principal problema se presenta en el armado de una paleta agitadora. Su eje debe ser perfectamente ortogonal con el plano del ventilador, de lo contrario, se produce una precesión de la paleta comprometiendo la vida útil del ventilador. En reemplazo se utilizó un agitador de paleta comercial como el mostrado en la figura 24. El desarrollo realizado se podría aprovechar mejorando el ajuste del eje de la paleta con respecto al eje de giro del motor.



Figura 24: Agitador

3.5. Placa principal de control

Todo el sistema, a excepción del electroimán y de las ramas de LEDs, funciona con 5 Volts de alimentación. Esto se debe a que se buscó establecer un criterio para facilitar la electrónica involucrada. La energía suministrada a todos los dispositivos, a excepción de la bomba peristáltica y el electroimán, es a través de una fuente de PC, a la cual se le dejaron únicamente las salidas de 12 y 5 Volts.

El esquema de la figura 25 muestra la placa principal armada y los distintos puertos de conexión de los sensores y periféricos. Se dejaron dos líneas dedicadas a la alimentación de sensores. Dos salidas para los LEDs que corresponden a los pulsadores, que se encienden al presionarlos. Por último se resalta en qué pin hembra debe conectarse cada periférico o sensor para que el control del reactor se efectúe de forma óptima. La fuente del electroimán, la bomba peristáltica y el agitador se conectan directamente a la tensión de línea.

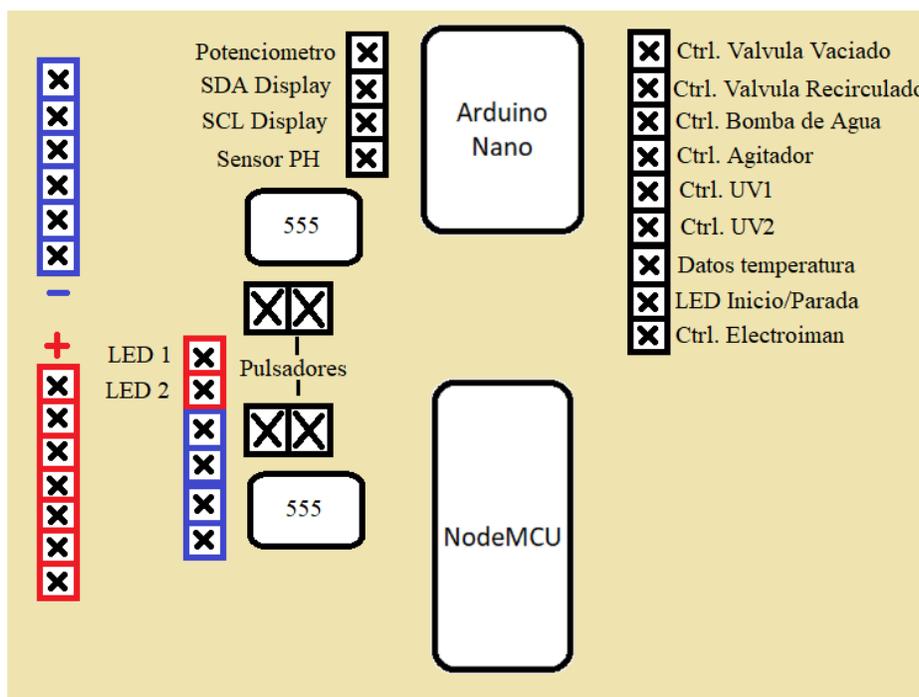


Figura 25: Disposición de componentes en la placa principal

3.6. Estructura y soportes

Para sostener al reactor y que permanezca inmóvil, se hizo uso de planchas de madera, varillas roscadas de hierro, arandelas y tuercas.

Las estructuras en la cual se encuentran el electroimán (como se observa en la figura 6), la batería de capacitores y las plaquetas fueron hechas en impresoras 3D a base de plástico PLA. Este material soporta temperaturas de hasta 180 C y es un aislante eléctrico. Se destaca en este diseño el fácil acceso al potenciómetro del sensor de PH para realizar ajustes de *offset*.

4. Software

4.1. Algoritmo

Bajo la premisa de hacer las cosas simples y sencillas, el algoritmo llevado a cabo consiste en una máquina de estados. Cada uno realiza lo siguiente:

- 1- Llenado del reactor: el agitador es energizado al igual que la bomba peristáltica, para llenar el recipiente donde ocurre la reacción. Durante este proceso, se leen los datos de temperatura y PH en el reservorio de control.
- 2- Radiación de energía UV: mientras la bomba peristáltica se encuentra activa, se energizan los LEDs para dar comienzo a la reacción deseada. También se leen y muestran los valores de PH y temperatura del reservorio de control. El agitador se encuentra en funcionamiento para mantener disuelto al catalizador en la solución.
- 3- Vaciado del reactor: en este estado se energiza el electroimán para extraer el agua tratada sin restos de catalizador. Como en el estado anterior, se leen temperatura y PH; y también se mantiene activo al agitador.
- 4- Configuración de tiempo de llenado del reactor.
- 5- Configuración de tiempo de radiación UV.
- 6- Configuración de tiempo de vaciado.
- 7- Configuración de cantidad de ramas de LEDs que se encienden
- 8- Configuración de RPM del mezclador.

- 9- Ajuste de inicio de pruebas de periféricos.
- 10- Ajuste para prueba de la bomba peristáltica.
- 11- Ajuste para prueba de los LEDs.
- 12- Ajuste para probar el electroimán.
- 13- Ajuste para probar el agitador.
- 14- Prueba de periféricos seteados.

Observación: en los estados 4, 5, 6, 7, 8 y 14 se muestran permanentemente los datos de PH y temperatura del reservorio de control. Los estados 9 a 14 no interfieren en el proceso principal de tratamiento, están destinados únicamente para poder realizar pruebas de los periféricos de forma rápida y sin necesidad de hacer una reconfiguración de todo el sistema.

Para mayor claridad, se ilustra en la tabla 3 los periféricos activos en los distintos estados:

	Bomba peristáltica	LEDs UV	Electroimán	Agitador
Estado 1	Activo	Inactivo	Inactivo	Activo
Estado 2	Activo	Activo	Inactivo	Activo
Estado 3	Activo	Inactivo	Activo	Activo
Estado 4	-	-	-	-
Estado 5	-	-	-	-
Estado 6	-	-	-	-
Estado 7	-	-	-	-
Estado 8	-	-	-	-
Estado 9	-	-	-	-
Estado 10	-	-	-	-
Estado 11	-	-	-	-
Estado 12	-	-	-	-
Estado 13	-	-	-	-
Estado 14	Activo/Inactivo	Activo/Inactivo	Activo/Inactivo	Activo/Inactivo

Tabla 3: Estados

4.2. Interfaz y Funcionamiento

En el display se indica siempre el estado en el que se encuentra la máquina de estados y mediante una breve leyenda se describe la acción realizada, como es posible visibilizar en la parte inferior en la figura 26. A la derecha de esta leyenda se muestra el tiempo transcurrido desde el inicio de la operación. En la parte superior del display se indica la temperatura en grados Celsius y el nivel de PH medido.



Figura 26: Interfaz física del prototipo

El modo de uso del reactor es a través de dos pulsadores, un potenciómetro y un display LCD. Su operación es intuitiva y de rápido aprendizaje. Con el pulsador de la izquierda o pulsador 1 se inicia el proceso, y se puede saltar entre los estados de llenado del reactor, radiación UV, Vaciado y Estado de configuración. El pulsador de la derecha o pulsador 2 permite alternar entre la configuración de los distintos parámetros. El pulsador 2 influye únicamente cuando el reactor se encuentra en cualquier estado de operación, caso contrario, sin importar que se lo manipule, no sucederá cambio alguno.

El botón de la izquierda permite dar inicio al proceso. Por una cuestión de seguridad y mayor control, una vez iniciado el proceso, es posible pasar al estado de radiación UV presionando una vez, al estado de vaciado del reactor presionando dos veces, y al estado de configuración presionando tres veces. También se tiene la ventaja de que se pueden saltar los estados y que realice solo las tareas deseadas en lugar del tratamiento completo.

La figura 27 permite comprender fácilmente la máquina de estados implementada a través de un diagrama de flujo.

El potenciómetro de la figura 26 permite ajustar los parámetros del reactor al encontrarse en el estado correspondiente. Ellos son:

- Tiempo de llenado del reactor.
- Tiempo de radiación UV.
- Vaciado del reactor.
- Cantidad de LEDs que se encienden durante el periodo de radiación.
- Cantidad de RPM que tendrá el mezclador en el reservorio de control.
- Encendido o apagado de los periféricos para el estado de pruebas.

Para evitar acciones indeseadas, el circuito tiene una protección anti rebote a través de hardware implementada con un integrado 555 en modo monoestable. Hay un indicador de luz debajo de cada pulsador que se ilumina al mandar la señal desde el circuito al microcontrolador. De esta forma es posible verificar que se manipula de forma correcta y facilita la identificación fallas de funcionamiento.

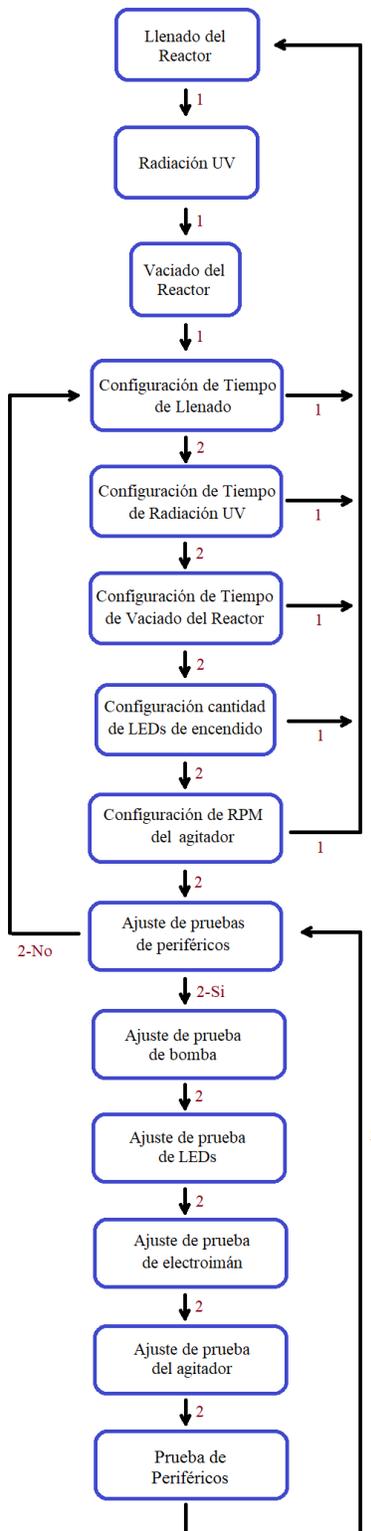


Figura 27: Diagrama de flujo

Existe otra forma de hacer un seguimiento del proceso, pero de forma remota. A través de la tecnología IoT (*Internet of Things*), es posible ver los valores de las variables y el estado en el que se encuentra. Todo esto a través de la plataforma Ubidots. Allí se desarrolló un *dashboard* o tablero de control que muestra estos datos. El inconveniente que tiene esto es que existe un retardo en la actualización de los valores de aproximadamente un minuto. Para procesos de poca duración esto no presenta una ventaja, pero para procesos duraderos, se tiene una noción de lo que está sucediendo. Cabe mencionar que esta plataforma permite exportar los datos en formato csv, por lo que se puede tener un registro histórico de la reacción foto catalítica, y estudiar detalladamente el catalizador. La figura 28 muestra lo armado. Se destaca la facilidad de la plataforma para adaptar el tablero de control acorde a la preferencia del usuario, por ejemplo, la forma de mostrar los valores que adopta la variable bajo seguimiento o el lugar en el que se encuentran los recuadros en el tablero.



Figura 28: Interfaz a través del servidor web UBIDOTS

4.3. Consideraciones del código

Este trabajo cuenta con dos códigos implementados: el del Arduino Nano y el del NodeMCU. El código del Arduino Nano cuenta con interrupciones iniciadas por los pulsadores. Las mismas permiten que el código opere en el estado deseado, y al detectar señales en los puertos correspondientes, surja un cambio de estado y de operaciones a realizar. Se destaca el uso de un algoritmo anti rebote, por lo que existe una doble barrera ante el ruido que producen los pulsadores, una por software y otra por hardware, con el objetivo de que existan la menor cantidad de lecturas erróneas por parte del microcontrolador. La comunicación con el display se hace a través del protocolo I2C y con la termocupla a través de su propio protocolo, incluido en la librería “one-wire”. La lectura de datos del sensor de PH es por una entrada analógica. La operación de los relays se hace a través de los estados alto y bajo de los pines. El control del mezclador es a través de los módulos de PWM integrados (seteados, estos módulos continúan en estado de operación aunque el microcontrolador se encuentre ejecutando otras tareas).

Para el control de tiempos se hizo uso de la función millis(), la cual hace un conteo del tiempo transcurrido desde que se le da inicio al código. El tiempo máximo al que llega el contador antes de reiniciarse es de 50 días. Bajo operaciones normales esto no representa una limitación, pero se le recomienda al usuario a apagar el reactor cuando se encuentre en desuso para evitar inconvenientes y que la variable dedicada vuelva a cero en pleno proceso afectando la experiencia bajo estudio.

El código del NodeMCU consiste en conectarse a la red indicada. Se configura el protocolo de comunicación con el Nano y espera a que este le envíe los datos a retransmitir al servidor web.

El microcontrolador Arduino Nano es el que lleva adelante todo el control del reactor, y como el NodeMCU no admite ser esclavo en el protocolo I2C, se hace uso del protocolo UART. El mismo permite, bajo el lenguaje de programación de arduino IDE, enviar valores entre 0

y 254. Para enviar los datos a través de este protocolo y que el NodeMCU distinga si se trata de temperatura, PH o estado, se los envía como se indica en la tabla 4.

Valor	Dato enviado
Temperatura	Temperatura
PH	PH + 100
Estado	Estado + 200

Tabla 4: Cifrado de datos

Este modo de envío de datos reduce significativamente la cantidad de bits utilizados en la transmisión, y en el caso de que existan pérdidas de mensajes, el modo de transmisión permite identificar rápidamente de qué dato se trata.

Para controlar los periféricos se hizo uso de librerías de código abierto de Arduino IDE. Se detallan en el Anexo 8.1 las que fueron utilizadas.

5. Ensayos

5.1. Temperatura de los LEDs UV bajo condiciones operativas

Para evaluar el efecto de los LEDs en la temperatura del reactor, se dejaron activos los 12 LEDs que se encuentran anclados a la camisa por un período de 43 minutos. A su vez, se dejó uno en la misma habitación sin disipación alguna. Se armó una tabla con los valores de temperatura medidos de un LED de la camisa, el LED sin disipación y de la temperatura del aire en el interior de la camisa, representados en la figura 29. Se contó con el multímetro UNI-T Ut139c como instrumento de medición. La temperatura de la habitación en la cual se llevó a cabo la experiencia era de 19 grados Celsius.

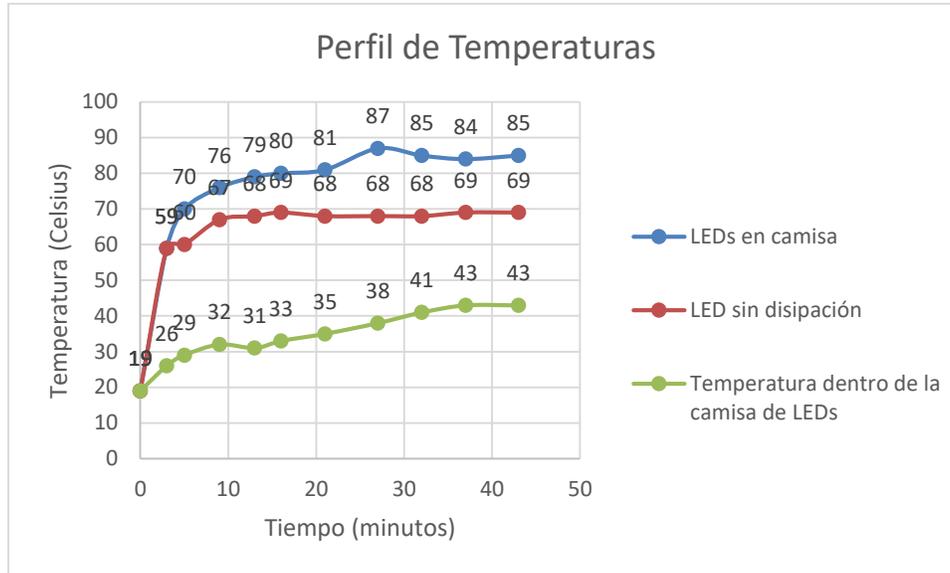


Figura 29: Tiempo vs Temperatura del funcionamiento de los LEDs

En poco menos de 40 minutos todas las partes alcanzaron su equilibrio térmico.

La diferencia de temperatura entre los LEDs de la camisa y el otro es de 16 grados celsius (medidos en la parte posterior, sobre la estrella disipadora), llegando los primeros a unos 85 y el segundo a 69. Mientras que la temperatura dentro de la camisa alcanzó unos 43 grados.

El estudio de la termodinámica [18] indica que el calor requerido para cambiar la temperatura de una masa m es de:

$$Q = mc\Delta T \quad (10)$$

Donde c es el calor específico del material y ΔT es la diferencia de temperatura a la que se lleva o se quiere llevar el material. El calor requerido guarda una relación lineal con la diferencia de temperatura.

Por otro lado, el flujo de calor por conducción se describe como

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L} \quad (11)$$

Donde k es la conductividad térmica del medio o del material, A es el área y L es la longitud del material que aísla dos cuerpos de diferente temperatura. T_H corresponde a la temperatura del cuerpo más caliente y T_C a la del cuerpo más frío.

Se procede a hacer un análisis cualitativo de la eficacia de la disipación termica propuesta debido a la complejidad de estimación de los parámetros del aire como conductor térmico. Todos los LEDs UV están hechos por el mismo fabricante bajo estándares predeterminados. Se considera entonces que la potencia térmica de todos es la misma.

Al emanar luz, parte de la potencia recibida se transforma en calor, haciendo que la temperatura aumente como se observa en la figura 29. La diferencia de incremento se debe principalmente a la diferencia de entornos. Mientras el LED que no tiene disipación se encuentra aislado y, podría decirse, en un entorno de 19 grados celsius constante, la camisa de LEDs al igual que su interior comienzan a calentarse, lo que reduce significativamente el flujo de calor de un cuerpo a otro.

Extrapolando los resultados y considerando un flujo de calor igual al del LED sin disipación, el que se encuentra en la camisa alcanzaría aproximadamente unos 93 grados. Se llega a esta conclusión por lo siguiente: La diferencia de temperatura en el LED aislado con su entorno es de 50 grados. Al estar en equilibrio térmico, el calor disipado es igual al calor generado. Si este equilibrio sucede a una diferencia de temperatura de 50 grados, el LED dentro de la camisa, considerando que todo su entorno se encuentra a 43 grados, debería estar la cantidad indicada por sobre los 43 grados, llegando a los 93 grados Celsius.

Por esta razón es que es posible concluir que el método de disipación térmica propuesto cumple con el objetivo de reducir la temperatura máxima que alcanzan los LEDs durante el proceso de tratamiento del agua. Si bien es cierto que el calor adquirido por los LEDs en la camisa es mayor, esto se debe a que el entorno a su alrededor comienza a calentarse, mientras que el del LED que se encuentra aislado se encuentra en su mayoría rodeado por aire que por efecto de convección podría considerarse a temperatura constante. Bajo las mismas condiciones, el poder de disipación de calor de los LEDs ubicados en la camisa sería menor sin el arreglo hecho, por lo que superaría fácilmente los 90 grados, condiciones no recomendadas para su operación.

5.2. Funcionamiento del electroimán

Se midió con el osciloscopio Tektronik TDS 210 la tensión entre bornes del electroimán para analizar si el circuito propuesto amortigua de forma exitosa el transitorio. La alimentación se

llevó adelante con una fuente switching genérica de 110 Watts, la misma que se utilizó en el armado final. Por razones de preservación de los equipos, no se hizo un ensayo de alimentación del electroimán de forma instantánea sin los capacitores en paralelo para contrastar mediciones.

Mediante la configuración de disparo único activado por un cambio de tensión en la entrada, se obtuvo el resultado que se muestra en la figura 30:

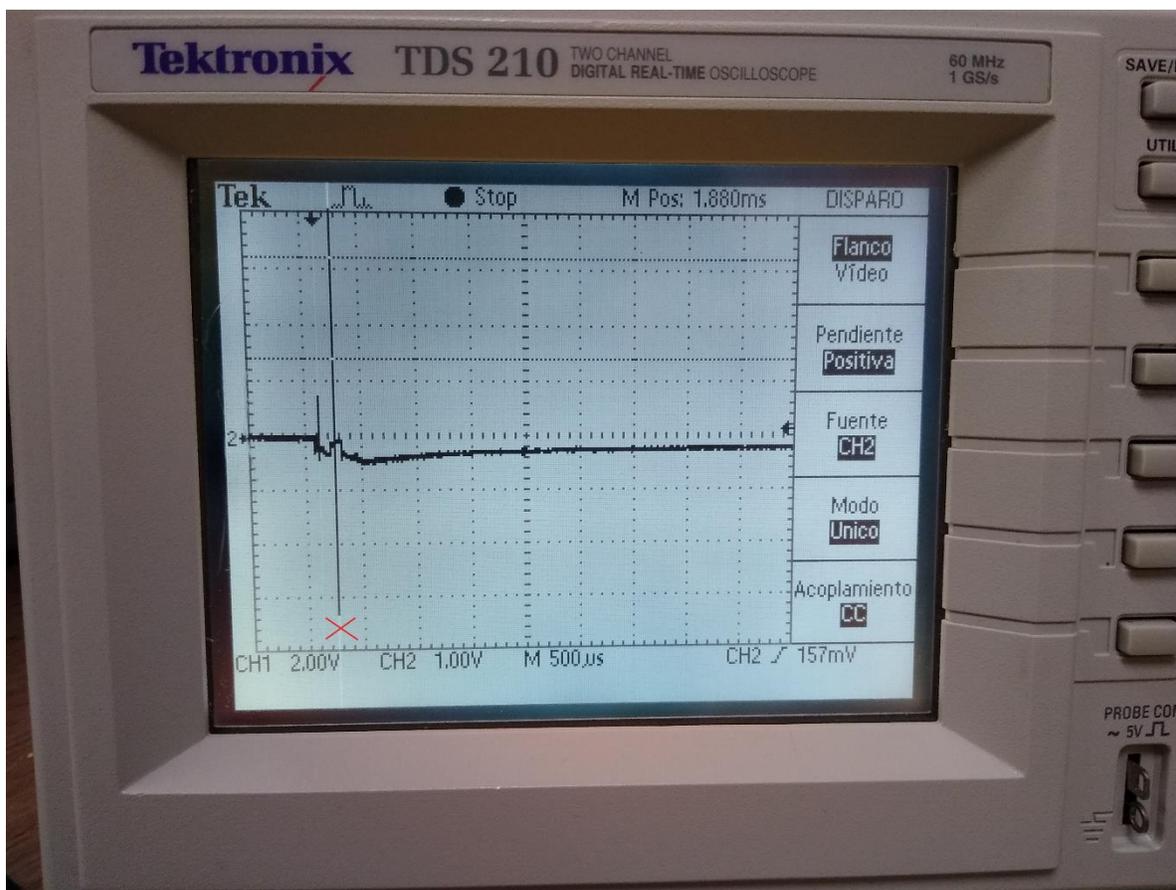


Figura 30: Respuesta al escalón del electroimán

Es evidente que al energizar al circuito del electroimán con una tensión constante, se producen pequeños picos de tensión entre sus bornes y luego uno muy abrupto y de muy corta duración, marcado con una X en la figura 30. Este fenómeno se debe al uso de relays. Los mismos no tienen un cierre perfecto al activarlos, dando origen a estos fenómenos. En paralelo con la batería de capacitores se colocó uno de 15 picofaradios. Su función es evitar que estos picos de tensión sean aún más abruptos. Acorde a la teoría, esas variaciones de

tensión a frecuencias tan altas deberían ser filtradas por el arreglo de capacitores de 9 mili Faradios aproximadamente, que actúan, en términos de control, como un filtro pasa bajos de una frecuencia de corte de unos cientos de Hertz. En la práctica ocurre que los capacitores electrolíticos no llegan a cargarse y descargarse correctamente, por lo que no pueden filtrar este tipo de sucesos. El capacitor cerámico de baja capacidad tiene la particularidad de que su carga y descarga es significativamente mayor, teniendo mejores aptitudes para mitigar esas variaciones de alta frecuencia.

Luego de esta diferencia al comienzo del transitorio, el circuito se comporta de la misma forma que lo expuesto en el desarrollo teórico. Queda demostrado que la fuente es capaz de energizar el circuito sin inconvenientes, por lo que puede considerarse que la impedancia del electroimán quedó adaptada.

5.3. Retención de nano partículas por campo magnético

Para capturar las nanopartículas se implementó una trampa basada en lana de hierro que se coloca en la abertura del electroimán. Las líneas de campo que se cierran en cada brazo del electroimán magnetizan la lana de hierro, permitiendo la captura de las nanopartículas. Esto se muestra en las figuras 31 y 32.

Con el fin de analizar la eficiencia en la retención de las nanopartículas se hicieron ensayos de captura magnética, utilizando nanopartículas magnéticas de magnetita Fe_3O_4 , sintetizadas en el laboratorio PAOyN (PROBIEN-CONICET) [20]. Se utilizaron dispersiones de 100 mg/L de Fe_3O_4 en agua destilada, previamente agitadas en ultrasonido para asegurar una correcta dispersión, ya que las nanopartículas presentan una tendencia a formar aglomerados. Para comprobar la presencia de nanopartículas en el agua se utilizó un espectrofotómetro UV-visible, y se obtuvieron los espectros de absorbancia de las nanopartículas dispersas en agua.

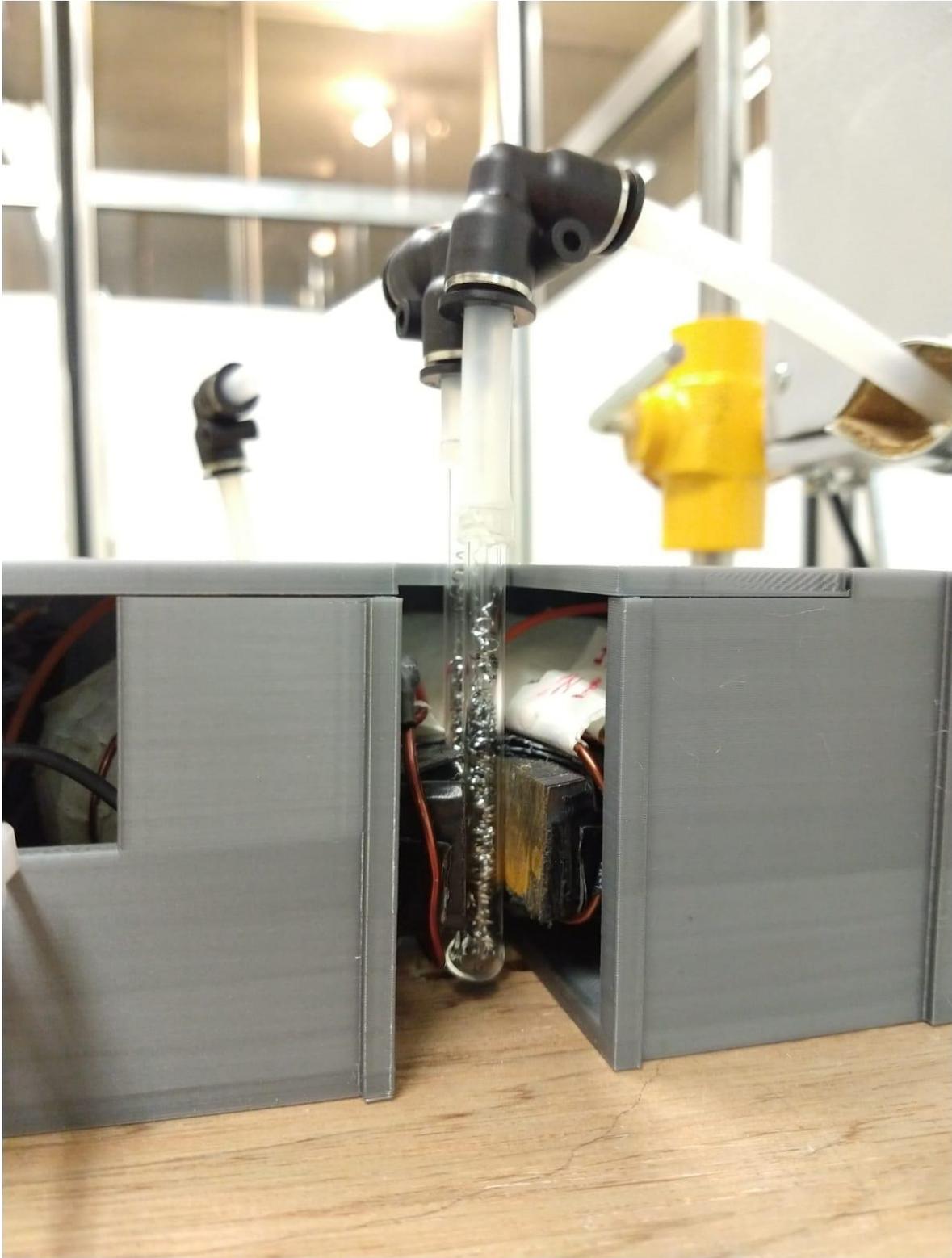


Figura 31: Vista del corte del núcleo del electroimán con recipiente de lana de hierro.



Figura 32: Recipiente contenedor de la lana de hierro para la separación magnética.

El primer paso para realizar este procedimiento fue tomar muestras durante el proceso de funcionamiento. Se colocó, en el reservorio principal del reactor, agua destilada y magnetita, el catalizador utilizado. Luego se los hizo recircular para llenar todos los conductos y el reactor propiamente dicho. Transcurrieron unos treinta minutos aproximadamente, en donde se mantuvo el agitador y la bomba peristáltica encendidos para mantener el catalizador disuelto. Acto seguido, se tomó una muestra del líquido, la muestra 0. A partir de esto se energizó el electroimán con 4 amperes y se eliminó la recirculación del sistema, vertiendo el fluido en un segundo recipiente, del cual se fueron tomando las muestras a diferentes tiempos.

Se realizaron dos ensayos de separación de las nanopartículas, variando levemente los tiempos. El primero está representado por la figura 33, donde se ven imágenes de muestras tomadas en diferentes tiempos, desde el tiempo 0 previo a la energización del electroimán (Muestra 0) hasta los 6 minutos (Muestra 6). Se ve claramente que el agua muestreada pasa de un color marrón oscuro, que indica la presencia de nanopartículas, a un color cristalino esperable para el agua limpia.

Se representan los espectros de la figura 34 en la curva de recuperación de la figura 35 para dejar más claro el resultado de este experimento, que consiste en la absorbancia a 450 nm de cada tiempo, normalizada respecto a la de tiempo 0. Nuevamente se ve que a partir del medio minuto se logra la máxima retención de las partículas. Los aumentos al minuto y medio y a los 4 minutos pueden estar mostrando liberaciones de cantidades pequeñas de catalizador por efecto mecánico, logrando vencer la atracción del campo magnético.

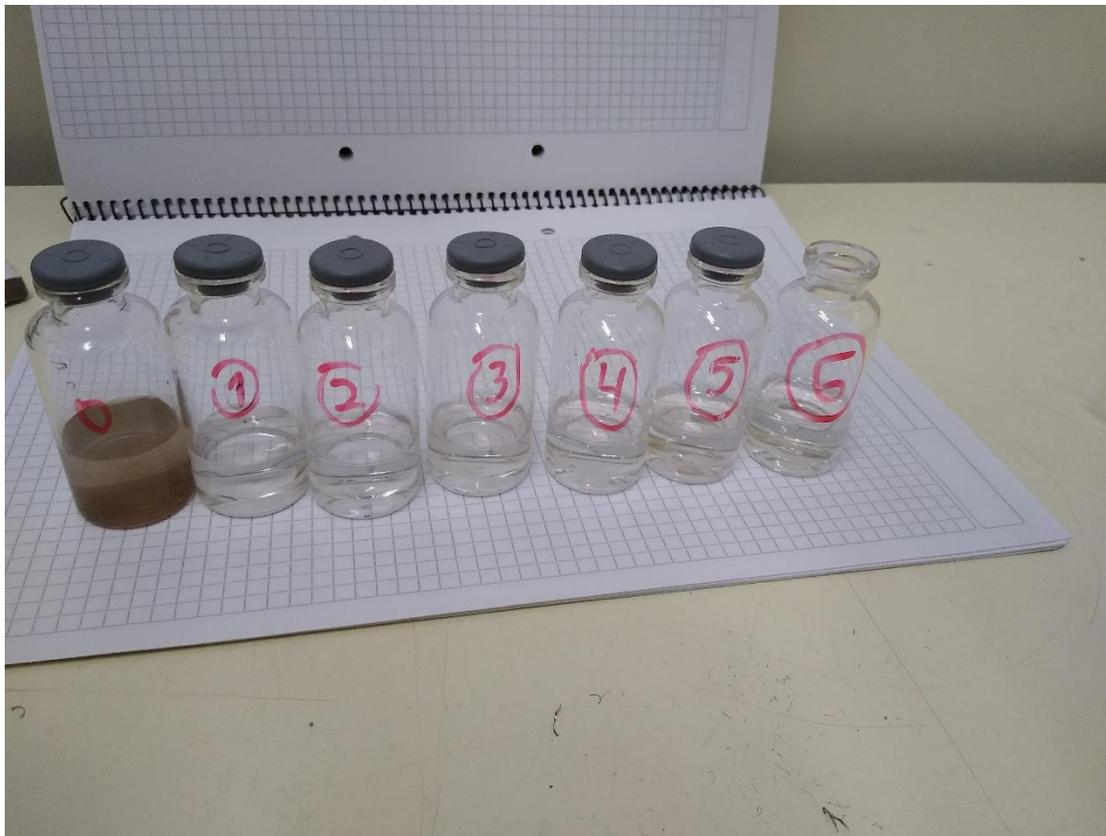


Figura 33: Muestras tomadas. 0: Antes de encender el electroimán. 1: 5 segundos luego de encender el electroimán. 2: a los 30 segundos del encendido del electroimán. 3: Transcurridos 1 minuto 30 segundos. 4: Luego de 2 minutos 30 segundos del encendido. 5: A los 4 minutos del encendido del electroimán. 6: Transcurridos 6 minutos del encendido.

Cuando se trata del tratamiento de aguas, la meta es lograr la retención total del catalizador. Sin embargo, los resultados son muy satisfactorios, ya que, acorde a lo realizado, se podría estimar que un 5% del catalizador no es retenido. En el caso de que se quiera utilizar al prototipo como un potabilizador, y no como una plataforma para el estudio de la reacción y/o de catalizadores, podría agregarse una segunda etapa, en donde se deje decantar el agua tratada para terminar de separar el fotocatalizador, o probar con una segunda etapa de filtrado por campo magnético.

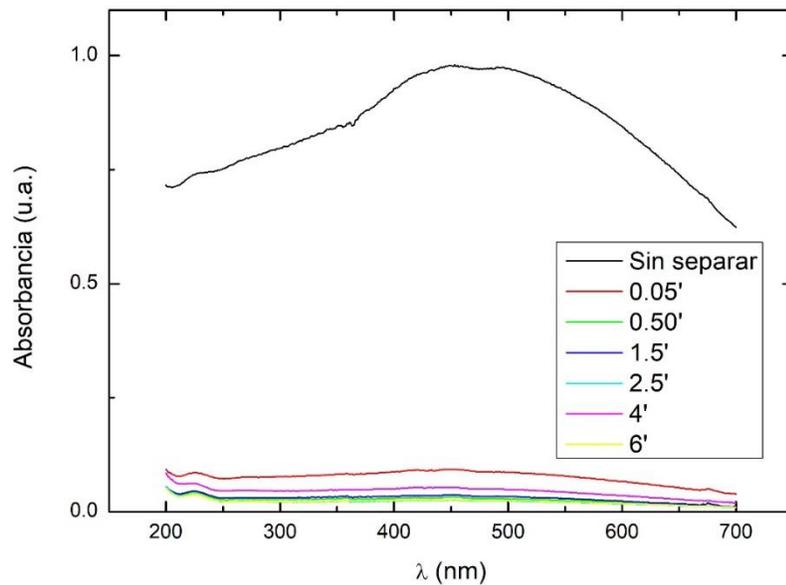


Figura 34: Absorbancia de distintas longitudes de onda

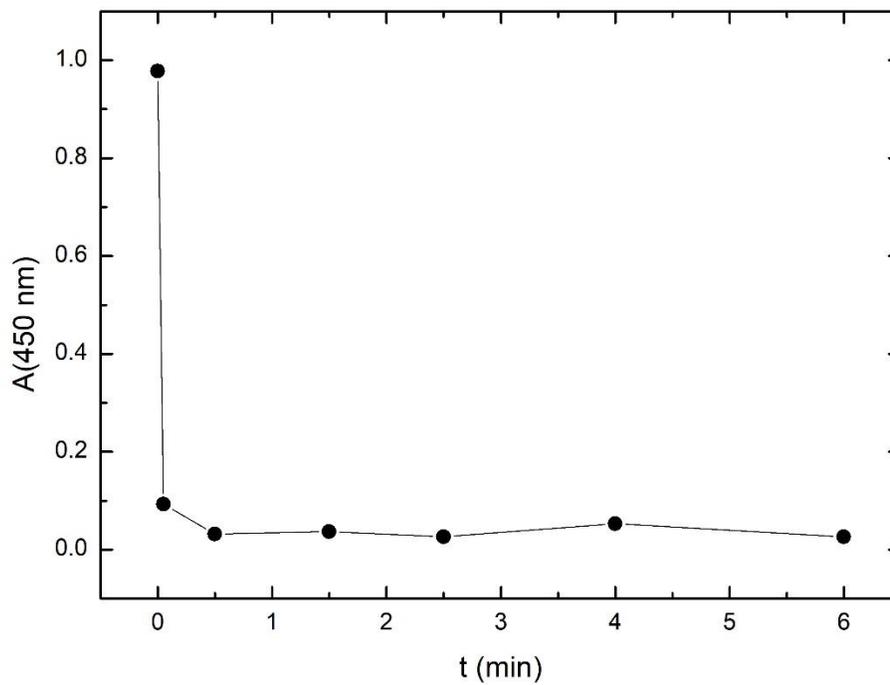


Figura 35: Curva de absorbancia normalizada a 450 nm vs. Tiempo de la magnetita dispersa en agua.

5.4. Degradación del contaminante

Para comprobar si el reactor foto catalítico era capaz de cumplir con su cometido, se realizaron dos tipos de ensayos de degradación: la degradación del colorante naranja G a valores de pH 3 y 4 [19]. Se utilizan colorantes para el análisis de estos procesos por los numerosos estudios existentes de su degradación.

Durante los procesos de degradación, se realizaron variaciones de distintos parámetros para poder demostrar la versatilidad del reactor. La magnetita que actuó de catalizador fue la misma que se utilizó para evaluar la efectividad de retención de partículas en la sección 5.3.

5.4.1. Degradación a pH 3

Para llevar a cabo este ensayo se definió un volumen total de operación de 500 mL de solución a tratar. Se preparó una solución de 200 mg/L de nano partículas de Fe_3O_4 [20] en agua Milli-Q® y se la llevó a pH 3 utilizando ácidos y bases fuertes. Acto seguido, se incorporaron 50 mL de solución de naranja G de una concentración de 54 mg/L, que también se encontraba a pH 3. Un baño de ultrasonido fue utilizado para asegurar la dispersión de las nanopartículas. La figura 36 muestra la coloración de la solución con el contaminante y el catalizador.



Figura 36: Solución de naranja G y nano partículas de Fe_3O_4 antes de la incorporación de H_2O_2

Se inició el ensayo al introducir el volumen total en el reactor. El proceso de llenado de todos los conductos duró aproximadamente 8 minutos, comenzando así el recirculado de la solución. Después se vertieron 500 micro litros de H_2O_2 pura en el transcurso de 5 minutos,

en búsqueda de una buena distribución en la solución. Se observó que se desarrolló el efecto fenton, pero el mismo obtuvo la energía necesaria de forma térmica y no a través de la energía lumínica. El colorante naranja G fue eliminado rápidamente.

Para lograr ensayar el reactor se adicionaron 50 mL más de colorante a la solución inicial, tratando un volumen total de 550 mL con una concentración de colorante de 9,8 mg/L, aproximadamente el doble de la concentración inicial. En este momento se tomó una muestra, en el “tiempo cero”.

Transcurridos 5 minutos de recirculación, los LEDs UV fueron energizados para entregarle energía a la solución. En un transcurso de 20 minutos se tomaron muestras, representadas en la figura 38. Al disminuir la absorción del espectro irradiado, se infiere que se aumenta la degradación.

La figura 37 muestra el espectro de absorción típico del contaminante, mientras que la figura 38 muestra el correspondiente para el tiempo cero. Analizando ambas se concluye que en el tiempo cero el contaminante ya se encuentra degradado, y que el espectro de la figura 38 corresponde a alguno de los estados intermedios de la degradación, momento previo a la mineralización [19].

Para finalizar la experiencia, se llevó a cabo la separación haciendo uso del electroimán. Transcurridos 40 minutos, se tomó una muestra (ver figura 39). La claridad del agua permite corroborar visualmente la efectividad del proceso de tratamiento llevado a cabo y de la separación magnética.

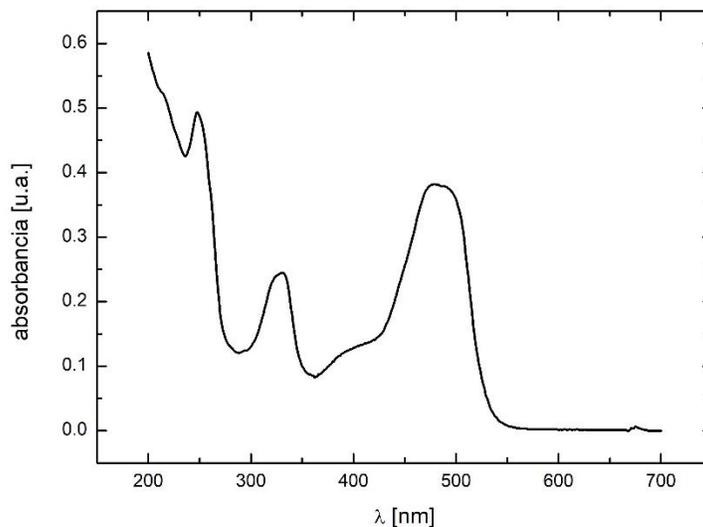


Figura 37: Espectro de absorción de naranja G disuelto en agua

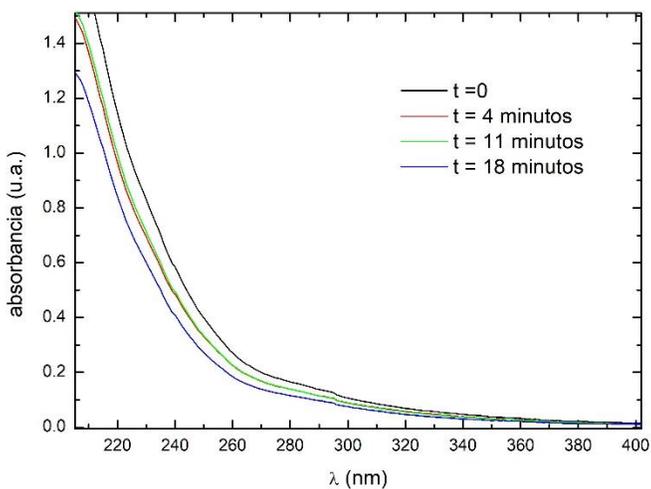


Figura 38: Espectro de absorción de naranja G disuelto en agua con radiación UV



Figura 39: Producto del tratamiento finalizado de agua a pH 3 con nano partículas de Fe_3O_4 y de la separación magnética

5.4.2. Degradación a pH 4

Para este ensayo se trató un volumen total de 800 mL, con una concentración final de catalizador de 100 mg/L, una concentración de colorante naranja G de 10,1 mg/L y un volumen de H₂O₂ inicial de 0,8 mL. Se buscó que el Fenton térmico no influya en el proceso de foto-Fenton con estas condiciones iniciales.

Del mismo modo que para el ensayo a pH 3, se tomó la muestra en el “tiempo cero” para contrastar con las del transcurso del ensayo mientras se hacía recircular la solución en el reactor. Treinta minutos después se encendieron los LEDs y se extrajeron muestras hasta completado un tiempo de dos horas. En este punto la temperatura del reservorio indicaba 25,9 °C y un pH alrededor de 3,5. Se adicionaron 200 µL de agua oxigenada, adicionando 20 minutos más de reacción al tiempo total.

La figura 40 exhibe los espectros de absorción durante el proceso de degradación del contaminante. La figura 41 representa la curva de degradación a través de la medición de la absorbancia de luz de 480 nanómetros de longitud de onda. Los valores están normalizados, siendo el patrón la absorbancia obtenida a los treinta minutos de comenzado el ensayo, al momento del encendido de los LEDs. El tiempo inicial se considera el necesario para que el contaminante adsorbido en las nanopartículas se libere, razón por la cual se aprecia un aumento inicial en la absorción.

Los resultados muestran que, aunque el tratamiento de agua puede ser mejorado mediante un estudio con mayor detalle y atención a los distintos parámetros, este se puede llevar adelante. Por esta razón es válido afirmar que el prototipo armado cumple con los objetivos establecidos. Gracias a esto, es posible concluir que es necesario optimizar la concentración de contaminante y foto catalizador, y el pH del experimento para mejorar la eficiencia.

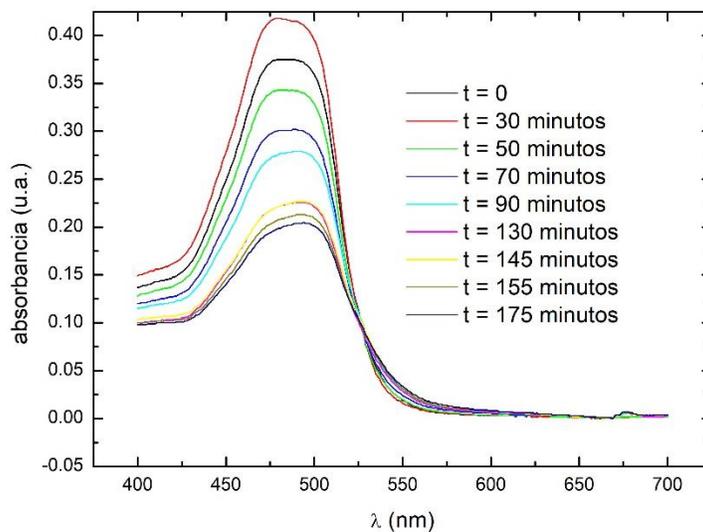


Figura 40: Espectros de degradación de naranja G con NPs de Fe_3O_4 a pH 4

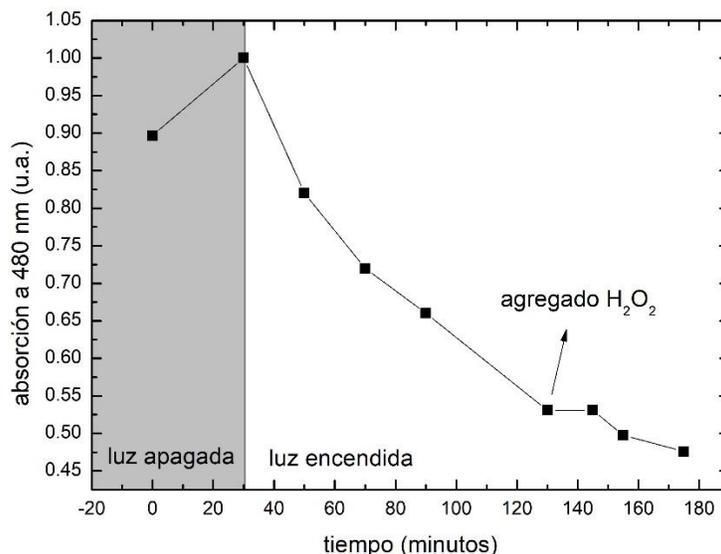


Figura 41: Absorción normalizada a 480 nm en función del tiempo del experimento de degradación de naranja G a pH

Quedó demostrado que el producto final es una plataforma apta para un estudio íntegro del proceso. Puede oficiar como herramienta para el desarrollo de un proceso óptimo que permita tratar agua de la forma más óptima posible, con posibilidades de llevarlo a gran escala, o a encontrar mejores catalizadores.

6. Conclusión

En este trabajo se me presentó la posibilidad de hacer una integración de conocimientos adquiridos en la carrera y también fuera de ella, para lograr un producto final funcional y que

busca colaborar con un mal que nos afecta a todos. Todas y cada una de las características fueron pensadas para que el prototipo cumpla exitosamente su función mientras prima la sencillez y robustez. No se debe pasar por alto que la plataforma de prueba siempre estará sujeta a cambios, ya sea por modificaciones de los procedimientos químicos, o para optimizar procesos, propio del uso cotidiano. Es por ello que complejizar mucho ciertas tareas o los circuitos resultaría contraproducente en numerosos casos. La operación y codificación por bloques fue una gran ventaja para este trabajo, ya que permite realizar cambios de forma sencilla. Después de todo, la ingeniería se basa en aplicar el ingenio para solucionar un problema de la forma más conveniente para el usuario final, con los recursos con los que cuenta y considerando la mayor cantidad de aspectos posibles. Agradezco haber tenido la posibilidad de implementar ideas propias y tener el apoyo y acompañamiento de todo el equipo, quienes sugirieron mejoras a lo largo del proceso para mejorar el producto final, ya que ellos serán los que posteriormente lo operarán y quienes mejor conocen los procesos que se llevarán adelante.

Teniendo en cuenta el propósito que tiene este reactor, sería una buena propuesta como mejora la búsqueda de un mejor aprovechamiento de la energía, ya sea por parte de los periféricos o de los microcontroladores. También podría implementarse algún tipo de sistema de control que permita hacer una regulación autónoma de la corriente del electroimán.

7. Referencias Bibliográficas

[1] *Distribución de Agua en el Planeta*. *Gob.mx*. Recuperado el 7 de Noviembre de 2022, de <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>

[2] O. M. Rodriguez-Narvaez, J. M. Peralta-Hernandez, A. Goonetilleke, y E. R. Bandala, «Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review», *Chemical Engineering Journal*, vol. 323, pp. 361-380, sep. 2017, doi: 10.1016/j.cej.2017.04.106.

[3] A. I. Stefanakis y J. A. Becker, «A Review of Emerging Contaminants in Water: Classification, Sources, and Potential Risks», *Impact of Water Pollution on Human Health and Environmental Sustainability*, 2016.

- [4] Gina M. Hincapié-Mejía, Gina M.; Ocampo, David; Restrepo, Glora M.; Marín, Juan M. 2011. Fotocatálisis heterogénea y Foto-Fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Información tecnológica vol. 22 (2)*. 33-42.
- [5] Petrucci, Ralph H.; Herring, Geoffrey F.; Madura, Jeffry D.; Bissonnette, Carey. 2011. *Química General*. Madrid, España. Pearson. P 113-120.
- [6] Chang, Raymond. 2010. *Química 10a. edición*. D.F., México. P 594-598.
- [7] Nogueira, R. P. F., Trovó, A. G., Da Silva, M. R. A., Villa, R. D., & De Oliviera, M. C. (2007). Fundamentos e aplicações ambientais dos procesos fenton e foto-fenton. *Quimica Nova*, 30(2), 400–408. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422007000200030>
- [8] S. Kurinobu, K. Tsurusaki, Y. Natui, M. Kimata, y M. Hasegawa, «Decomposition of pollutants in wastewater using magnetic photocatalyst particles», *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 310, n.º 2, Part 3, pp. e1025-e1027, mar. 2007, doi: 10.1016/j.jmmm.2006.11.072.
- [9] Mosleh, S., Rahimi, M. R., Ghaedi, M., Asfaram, A., Javadian, H., Sadeghfar, F., & Jannesar, R. (2018). Visible-light-driven photocatalytic degradation of fenpyroximate in rotating packed bed reactor using Fe₃O₄@PbS@Ni₂P magnetic nanocomposite photocatalyst: Response surface modelling and optimization: Visible light photocatalytic degradation of fenpyroximate. *Applied Organometallic Chemistry*, e4513. <https://doi.org/10.1002/aoc.4513>
- [10] Fernández, L., Gamallo, M., González-Gómez, M. A., Vázquez-Vázquez, C., Rivas, J., Pintado, M., & Moreira, M. T. (2019). Insight into antibiotics removal: Exploring the photocatalytic performance of a Fe₃O₄/ZnO nanocomposite in a novel magnetic sequential batch reactor. *Journal of Environmental Management*, 237, 595–608. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.089>

- [11] Li, Q., Kong, H., Li, P., Shao, J., & He, Y. (2019). Photo-Fenton degradation of amoxicillin via magnetic TiO₂-graphene oxide-Fe₃O₄ composite with a submerged magnetic separation membrane photocatalytic reactor (SMSMPR). *Journal of Hazardous Materials*, 373, 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.066>
- [12] Teja, R. (2021, January 12). *Arduino Nano Pinout, Board Layout, specifications, Pin Description*. Electronics Hub. <https://www.electronicshub.org/arduino-nano-pinout/>
- [13] Negi, A. (2021, November 11). Nodemcu ESP8266 Pinout, Specs, Versions with detailed board layout. *ETechnophiles*. <https://www.etechnophiles.com/nodemcu-esp8266-pinout-specs-board-layout>
- [14] (N.d.). Electronperdido.com. Retrieved November 3, 2022, from <https://electronperdido.com/wp-content/uploads/2019/05/ph-03.jpg>
- [15] Young, Hugh D., Freedman, Roger A. 2009. *Física universitaria, con física moderna volumen 2. Decimosegunda edición*. México. Pearson Education. P 968.
- [16] Calle, R. 1962. *Instrumentos y Medición*. Buenos Aires, Argentina. Centro de estudiantes de ingeniería “La línea recta”. P 83.
- [17] Dorf, R. C., Bishop, R. H., 2005. *Sistemas de control moderno*. Madrid, España. Pearson Education.
- [18] Young, Hugh D., Freedman, Roger A. 2009. *Física universitaria, con física moderna volumen 1. Decimosegunda edición*. México. Pearson Education. P 598-599
- [19] Tarkwa, J.-B., Oturan, N., Acayanka, E., Laminsi, S., & Oturan, M. A. (2019). Photo-Fenton oxidation of Orange G azo dye: process optimization and mineralization

mechanism. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 473–479.

<https://doi.org/10.1007/s10311-018-0773-0>

[20] Peralta, M. E., Nisticò, R., Franzoso, F., Magnacca, G., Fernandez, L., Parolo, M. E., León, E. G., & Carlos, L. (2019). Highly efficient removal of heavy metals from waters by magnetic chitosan-based composite. *Adsorption : Journal of the International Adsorption Society*, 25(7), 1337–1347. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00096-4>

8. Anexo

8.1. Librerías arduino utilizadas

- Adafruit unified sensor by adafruit version 1.1.4
- Dallastemperature por Miles Burton, Tim Newsome, Guil Barros, Rob Tillaart version 3.9.0
- Liquidcrystal i2c por Frank De Bradabander version 1.1.2
- Onewire por Jim Studt, Tom Pollard, Robin James, Glen Trewitt, Jason Dangel, Guillermo Lovato, Paul Stoffregen, Scott Roberts, Bertrik Sikken, Mark Tillotson, Ken Butcher, Roger Clark, Love Nystrom version 2.3.6
- Pubsubclient por Nick O'leary

8.2. Manual del usuario

Con el fin de orientar rápidamente al usuario, se describe brevemente cómo operar el equipo.

8.2.1 Encendido del reactor:

- a. Verificar que todos los cables se encuentren bien conectados a sus borneras correspondientes
- b. Ajustar la resistencia variable, para asegurar que la corriente del electroimán no supere los 4 ampere. Para esto, debe tener un valor mínimo de aproximadamente 2,7 Ohm.
- c. Conectar los cables con los cocodrilos a la resistencia variable. La terminal a la cual se conecten es indistinto. Se recomienda hacer uso de un multímetro para llevar un registro de la corriente, debido a que al circular corriente, el aumento de temperatura hace variar el valor de la resistencia. Es importante hacer uso de la terminal adecuada de la herramienta para su preservación debido al valor de corriente que se quiere medir.
- d. Enchufar la bomba peristáltica en el enchufe hembra que se encuentra conectado al relay de la caja de comando. En el caso de usar un agitador externo, agregar un extensor y conectar ambos dispositivos a este terminal.
- e. Enchufar la fuente de PC, la fuente de potencia del electroimán y el cable que se encuentra conectado al relay de la caja de comando a la corriente.
- f. Encender la fuente de PC.

8.2.2. Operación

La figura 42 muestra el panel de control del reactor. El pulsador de la izquierda o pulsador 1 permite controlar la actividad del reactor, es decir, darle inicio, o parada al proceso de tratamiento. El pulsador 2 permite navegar entre las distintas opciones de configuración. El potenciómetro (la perilla que se encuentra a la derecha) permite hacer un ajuste de los tiempos del proceso de tratamiento así como también el acceso a los estados de prueba. La figura 44 permite entender rápidamente la forma en la que funciona la máquina de estados.



Figura 42: Panel de control del reactor

En el algoritmo está considerado el hecho de que cualquier periférico falle, o que se requiera el uso de sólo uno. El menú de pruebas permite corroborar el correcto funcionamiento de las partes. La lógica detrás de este menú es, configurar qué periféricos se van a energizar, para probarlos a continuación. En esta fase se utilizan únicamente el potenciómetro y el pulsador 2.

Los LEDs que se encuentran debajo de los pulsadores se prenden cuando se envía la señal del circuito anti rebote al micro controlador. Esto facilita encontrar fallas o identificar si se pulsó de forma adecuada el pulsador. El LED rojo se enciende cada vez que el reactor está funcionando, ya sea cuando el proceso de tratamiento transcurre o cuando se están probando los periféricos.

Para apagar el reactor basta con apagar la fuente de PC y la fuente del electroimán.

8.2.3. Sensores

El sensor de PH necesita, según el fabricante, un minuto para estabilizarse. Se recomienda dejar transcurrir este tiempo luego de encender el reactor para hacer el ajuste de offset correspondiente.

8.2.4. Conexiones y Hardware

Todos los elementos que se encuentran dentro de la caja impresa al igual que la totalidad de sensores, trabajan con una tensión de 5 Volts. Las borneras se encuentran marcadas para indicar en dónde va el positivo. En el borne marcado deben introducirse los 5 Volts.

La placa principal se dispone como muestra el esquema de la figura 43. Allí se indica cómo están dispuestos los pines hembra y a qué corresponden según el código y las conexiones realizadas.

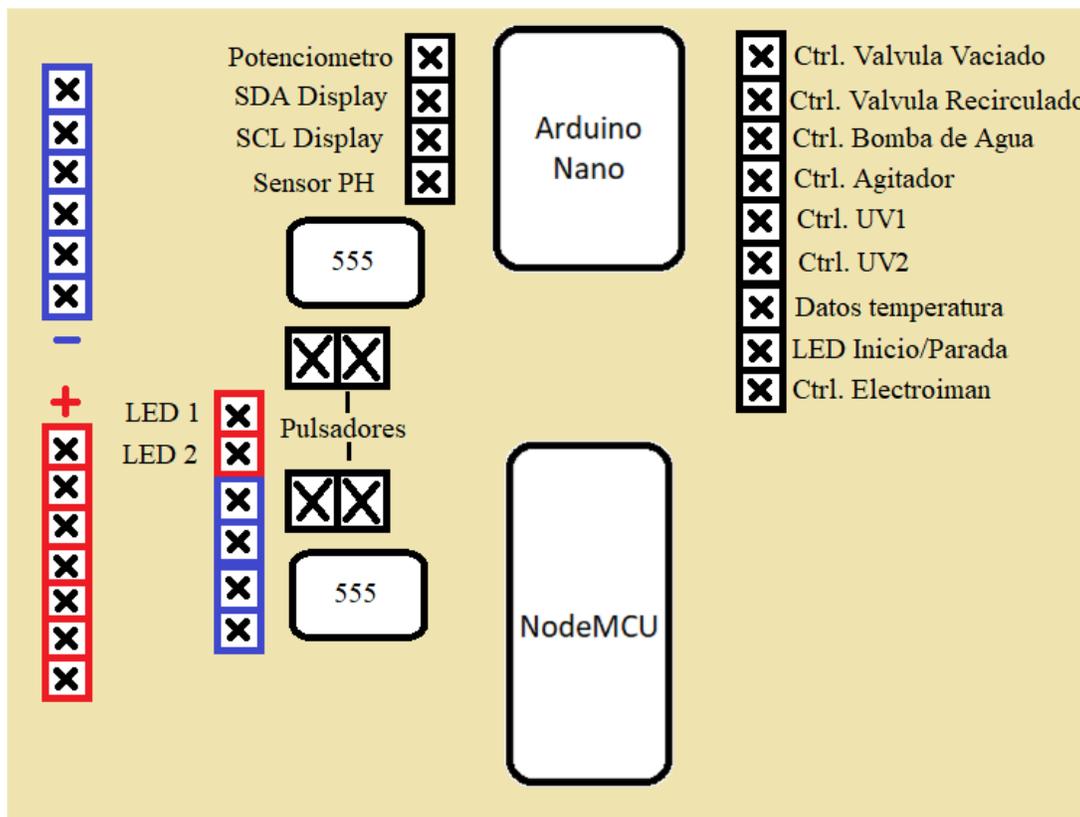


Figura 433: Distribución de componentes y puertos en la placa principal

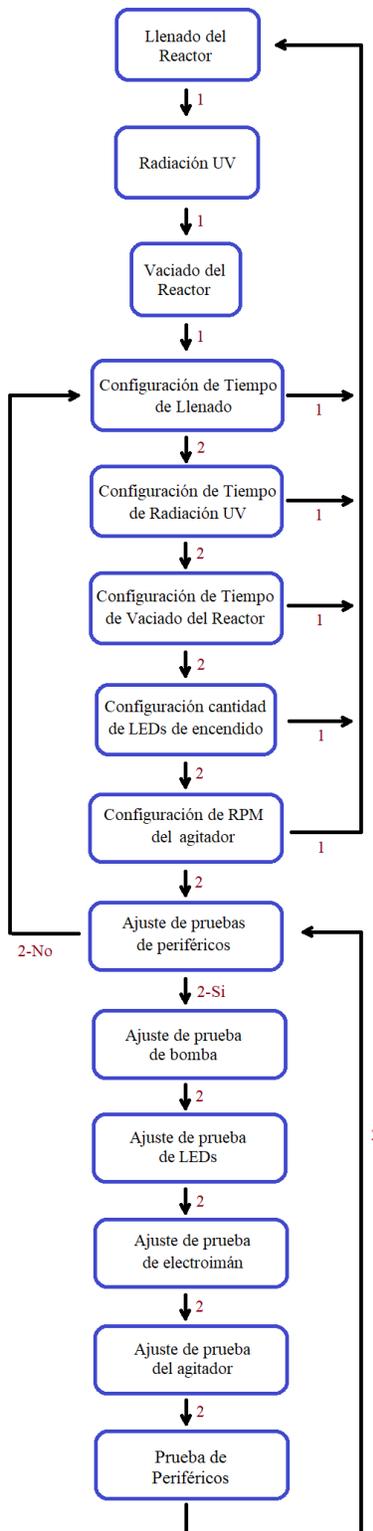


Figura 444: Diagrama de flujo del algoritmo

8.2.5. Placa de control del agitador

La figura 45 representa la placa armada para el control y la alimentación del cooler que actúa como agitador. En la parte superior deben conectarse la alimentación y la señal PWM del Arduino (esta última en el pin hembra IN). La parte inferior corresponde a una bornera. En el borne GND debe conectarse el negativo de la fuente. El borne OUT se conecta a la salida del cooler. La figura 46 ilustra de forma más clara cómo armar esta disposición.

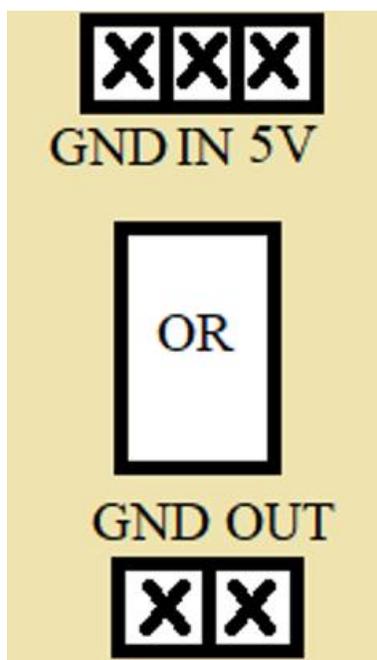


Figura 45: Placa de alimentación y control del agitador

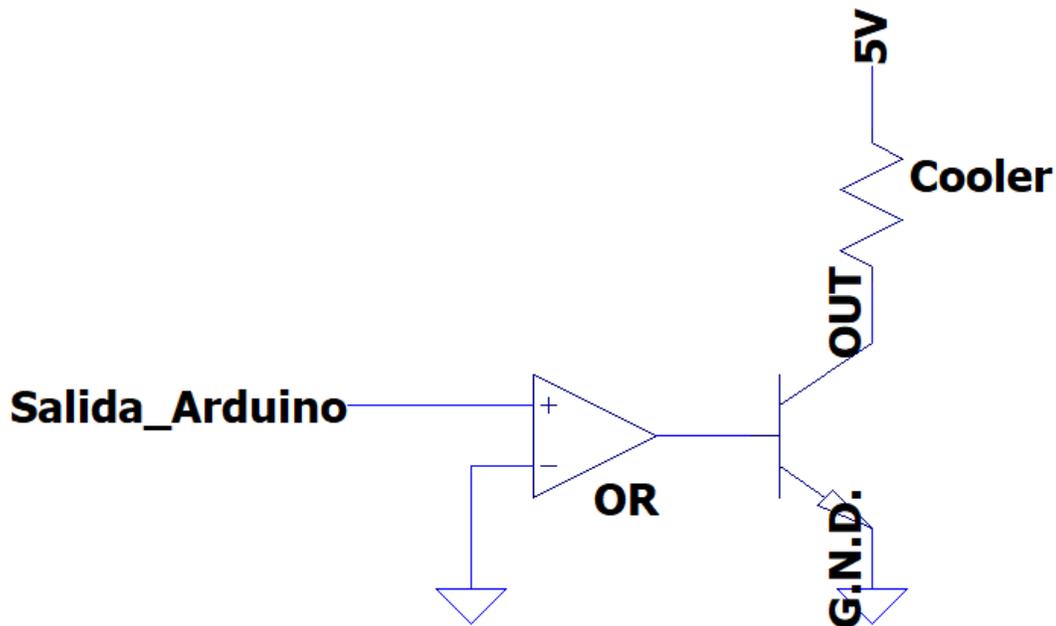


Figura 46: Circuito del agitador

8.2.6. Interfaz a través del servidor web Ubidots

El dashboard (figura 47) muestra las variables medidas y el estado en el que se encuentra el reactor. Tener en cuenta que existe un retardo aproximado de 1 minuto entre que se mide la variable y se actualiza el valor en el servidor web. El mismo puede editarse acorde al gusto del usuario. Incluso puede descargarse, desde el menú de opciones, un archivo .csv que incluye el registro histórico para realizar un estudio a posteriori del proceso bajo análisis. Se informa que a través de este servidor web únicamente se pueden visualizar los valores de las variables sensadas, no es posible operar de forma remota el reactor.



Figura 47: Dashboard del servidor web UBIDOTS

8.2.7. Observaciones

En el caso de que se desee reprogramar alguno de los microcontroladores, es necesario retirarlos de la placa, ya que el protocolo de comunicación por el cual se realiza esta acción es el mismo que utilizan para comunicarse entre ellos.

Para el control de tiempos se hizo uso de la función `millis()`, la cual hace un conteo del tiempo transcurrido desde que se le da inicio al código. El tiempo máximo al que llega el contador antes de reiniciarse es de 50 días. Bajo operaciones normales esto no representa una limitación, pero se le recomienda al usuario a apagar el reactor cuando se encuentre en desuso para evitar inconvenientes y que la variable dedicada vuelva a cero en pleno proceso afectando la experiencia bajo estudio.