

# **Desarrollo de un sistema respirométrico para determinar la biodegradabilidad en compost**

**Carolina Iacovone, Federico Yulita**

**Laboratorio 6**

**Depto. de Física - FCEyN - UBA**

**Agosto 2021**

## **Alumnos**

Carolina Iacovone      LU N°: 120/17      E-Mail: caroiacovone@gmail.com  
Federico Yulita      LU N°: 351/17      E-Mail: federico\_yulita@hotmail.com

## **Lugar**

Laboratorio de Polímeros y Materiales Compuestos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

## **Directores**

Dr. Lucas Guz      E-Mail: guzlucas85@gmail.com  
Dra. Lucía Famá      E-Mail: lfama@df.uba.ar

## **Firmas**



Federico Yulita



Carolina Iacovone



Dr. Lucas Guz



Dra. Lucía Famá

## I. RESUMEN

Los plásticos son una de las principales fuentes de desechos sólidos de las grandes ciudades del mundo que generan importantes daños medioambientales, ya que tardan miles de años en degradar, pudiendo provocar alta toxicidad. Una alternativa para mitigar esta clase de problemas es el uso de plásticos compostables, que, en las condiciones ambientales adecuadas, pueden degradarse de 1 a 6 meses. Actualmente, en Argentina se están comercializando estos productos y resulta necesario un estándar que evalúe la biodegradabilidad de los mismos. En este trabajo, se diseñó, fabricó y puso a punto un equipo capaz de estudiar la biodegradabilidad de polímeros en condiciones de compostaje bajo la norma ISO 14855. Para ello, se construyó un sistema que pudiera capturar y determinar la concentración de CO<sub>2</sub>, manteniendo la temperatura del compost en 52°C, como lo establece la norma ISO 14855. Se caracterizó el funcionamiento del equipo y se lo optimizó a partir de diferentes ensayos con componentes ya evaluados en la literatura. A partir de lo observado, se pudo determinar que el equipo fabricado cumplía con la norma propuesta, resultando muy prometedor para su empleo en el estudio de la biodegradabilidad de plásticos compostables.

## II. INTRODUCCIÓN

La inmensa producción de plásticos en el mundo supera las 300 millones de toneladas por año, y el número se incrementa año a año [1]. La mayoría de los plásticos son polímeros obtenidos a partir de petroquímicos no renovables que, debido a su alto peso molecular, hidrofobicidad y a la ausencia de grupos funcionales que sean susceptibles a ataques microbianos, agua, luz, entre otros; resultan materiales recalcitrantes que demoran cientos de años en degradarse al ser descartarlo [2]. Alrededor del 40% de los plásticos fabricados en el mundo son de un solo uso y cerca del 90% de los mismos se descartan en rellenos sanitarios y cursos de agua, lo que conlleva a una gran contaminación en el ambiente, tanto en tierra como en agua.

Actualmente, los plásticos mejoran la calidad de vida de miles de millones de personas en todo el mundo, por lo que su desuso no será viable [3]. Es por esto que es de gran interés buscar alternativas que solucionen esta problemática. Una posible solución es reemplazar parte de los plásticos de uso cotidiano, por plásticos biodegradables.

La IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) define a un polímero biodegradable como aquel que es susceptible a degradación mediante actividad biológica, con disminución del peso molecular [4]. En las condiciones ambientales adecuadas, el proceso de biodegradación de un polímero se realiza en dos etapas fundamentales. La primera consiste en una fragmentación del polímero debido a hidrólisis iniciado por procesos químicos o biológicos (enzimas microbianas) que dividen la cadena principal en pequeñas cadenas de menor peso molecular. Luego, los microorganismos convierten el carbono presente del material junto con el oxígeno en CO<sub>2</sub>, agua y biomasa [5]. La reacción producida se muestra a continuación:



La biodegradación de un material puede ser evaluada mediante distintas técnicas, de manera directa o indirecta. Observaciones macroscópicas, medición de pérdida de masa y cambios en las propiedades mecánicas son las técnicas más sencillas para evaluar la degradación de un material, sin embargo no demuestran que necesariamente ocurra un proceso de biodegradación. La manera de evaluar si un material es o no biodegradable se basa en cuantificar la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido. La norma ISO 14855 es la que determina los requisitos y procedimientos necesarios para llevar a cabo, y a partir de la cual se puede definir a un material como biodegradable en condiciones de compostaje industrial [6]. Uno de los requisitos de la norma es que el equipo esté conformado por, al menos, 3 niveles, y que en cada uno de ellos se cuente con un recipiente que contenga compost: en uno con una muestra del material a analizar, en otro un material biodegradable conocido (por ejemplo, microcelulosa cristalina) como control positivo, y en un tercero, denominado blanco, sin ningún material adicional. Luego, el porcentaje de biodegradabilidad se cuantifica como

$$\% \text{ Mineralizacion} = \frac{gCO_2 - gCO_2b}{g_{material} (\% C_{material}/100) \frac{44}{12}} \quad (1)$$

donde gCO<sub>2</sub> es la cantidad en gramos de CO<sub>2</sub> evolucionado de la muestra y del control positivo, mientras que gCO<sub>2</sub>b es la cantidad de gramos de CO<sub>2</sub> del blanco, g<sub>material</sub> es la masa de la muestra utilizada medida en gramos y %C<sub>material</sub> es el contenido de carbono que tiene el material, que se determina previamente a través de un análisis elemental o determinación de carbono orgánico total (TOC) en el sólido.

Finalmente, un material se lo clasifica como biodegradable si alcanza el 90% de su degradación en compost en un plazo no mayor de 6 meses[7].

En Argentina en las últimas décadas se están comercializando productos biodegradables, por lo cual es necesario tener un protocolo que evalúe la biodegradabilidad de los mismos.

El objetivo de este proyecto fue diseñar, fabricar y poner a punto un equipo capaz de determinar la biodegradabilidad de polímeros en condiciones de compostaje industrial.

### **III. PROPUESTA DEL EQUIPO**

Con la intención de medir la evolución del CO<sub>2</sub> bajo los protocolos indicados en la norma ISO 14855, se propuso construir un equipo de 4 series como se visualiza en la **Figura 1**, compuestas de un reactor en cada una de ellas, donde se coloca el compost. La distinción de las series radica en que en el reactor de una de ellas se coloca un control positivo como material de referencia para controlar el correcto funcionamiento del equipo. Como material se utiliza celulosa, como lo indica la norma ISO, ya que es un polímero fácilmente biodegradable en estas condiciones. Otra serie, denominada *Serie Blanco*, se compone únicamente de compost, el cual cuantifica posible CO<sub>2</sub> cuya procedencia no se debe a la biodegradación. Por último, las dos *Serie Ensayo*, que contienen compost con la muestra del material a analizar.

La norma ISO 14855 establece que deben haber tres series para cada tipo; tres de referencia, tres blancos y tres de ensayo. Sin embargo, para llevar a cabo las primeras pruebas y hasta optimizar el equipo, se decidió armar cuatro series.

### **IV. DESARROLLO DEL EQUIPO**

La descripción del equipo se puede dividir en las siguientes partes:

- **Sistema Aeróbico:** Seguimiento del aire en todo el equipo.
- **Reactores:** Composición del ambiente donde se realizará el proceso de biodegradación.
- **Sistema Térmico:** Sistema de medición, monitoreo y control de la temperatura del reactor.

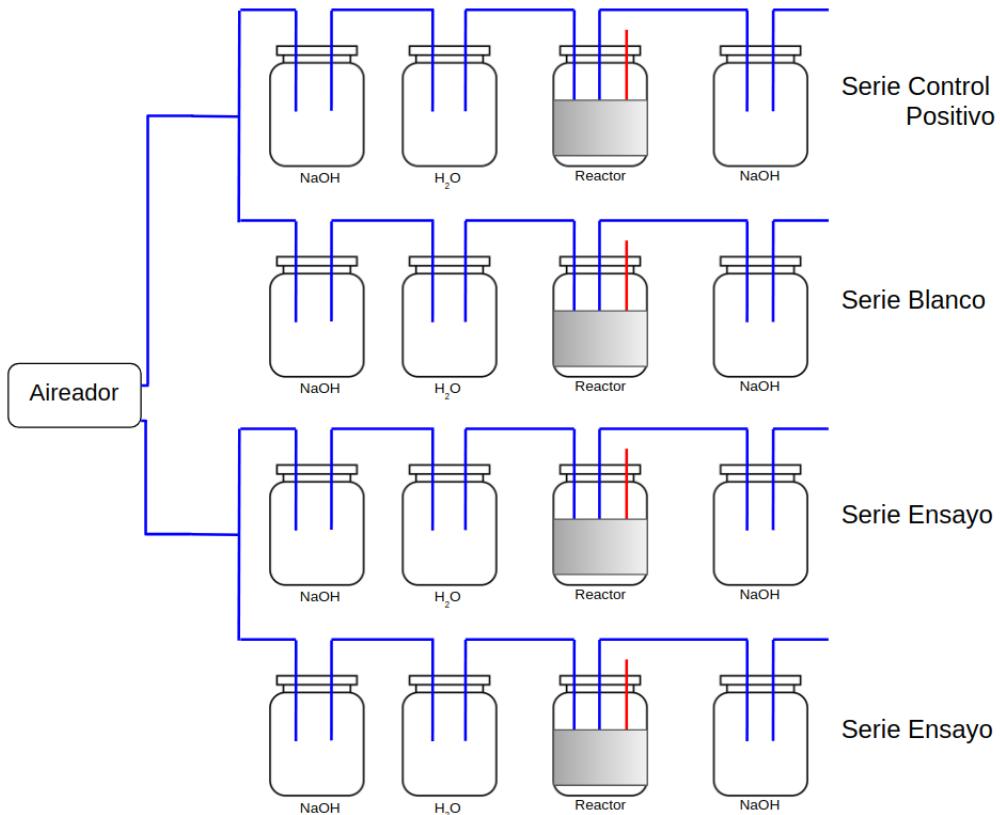


Figura 1: Esquema general de la propuesta experimental.

- **Medición del Dióxido de Carbono:** Método que se utilizó para medir el dióxido de carbono emitido.

#### A. Sistema Aeróbico

Los elementos utilizados para la construcción del sistema aeróbico fueron un aireador SOBO SB-638 de 2 salidas de 4.5 L/min en cada una, 10 metros de mangas de poliuretano de 6x4mm, 9 piedras difusoras de pecera, 36 prensacables de poliamida PG 4-8 mm, 9 frascos de polietileno de 1 L y 4 frascos de vidrio Schott Duran de boca ancha de 500 ml. Los elementos se colocaron como se esquematiza en la **Figura 2** para el caso de una serie, siendo similares para el resto de las series.

El aire proveniente del aireador circula a través de las mangas y llega a un frasco de polietileno con una solución 1 M de hidróxido de sodio (NaOH) de Sigma-Aldrich para capturar el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en la atmósfera. Luego, el aire circula del frasco con NaOH a otro frasco de polietileno con 500 ml de agua destilada para humidificar

el aire. Luego, fluye por una manguera para ingresar al frasco de vidrio (reactor) donde se realiza el proceso de biodegradación. Finalmente, el aire proveniente del reactor arrastra el CO<sub>2</sub> emitido por el compost y llega a otro frasco de polietileno con otra solución 1 M de NaOH para capturar el CO<sub>2</sub> emitido en el proceso de biodegradación.

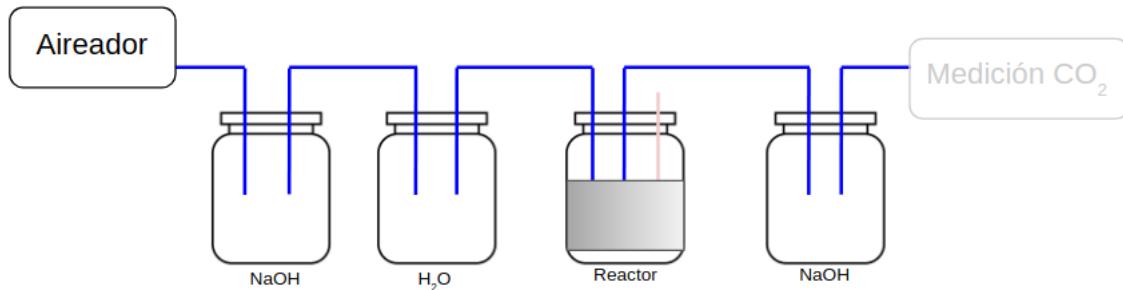


Figura 2: Esquema de una serie del equipo. En color azul se representan las mangueras, en rojo claro se representa un sensor de temperatura que luego se conecta al sistema térmico, y también en gris claro se encuentra el sistema de medición de CO<sub>2</sub>.

Debido a pérdidas, al cierre de los frascos de polietileno se le colocó teflón y a todos los prensacables dos o'rings, uno en su parte superior y otro en su parte inferior. La razón por la cual se utilizaron frascos de polietileno fue debido a que el NaOH reacciona y daña otros materiales. A las mangueras de entrada de estos frascos, por donde fluía el aire, se les colocaron piedras difusoras para que produjeran burbujas. Esto se hizo ya que a menor tamaño de las burbujas producidas por los difusores se incrementa la disolución y captura del CO<sub>2</sub> por parte de las trampas de NaOH, gracias a una mayor difusión de la fase gaseosa hacia la fase líquida.

En la **Figura 3** se muestran dos imágenes fotográficas del equipo finalizado.

## B. Reactor

Como reactor se utilizaron frascos de vidrio Schott Duran dada su alta resistencia a temperaturas mayores que 50°C, su buen cierre hermético y su boca ancha. A la tapa se le realizaron 3 agujeros para pasar dos mangueras (una de entrada y otra de salida) y un sensor de temperatura.

Se realizaron dos configuraciones para asegurar el aireado completo y homogéneo del compost en el frasco. La primera configuración consistió en perforar la manguera de entrada



Figura 3: Imágenes del equipo finalizado.

y ubicarla hasta el fondo del frasco. De esta forma, a medida que el aire fluye por la manguera, un pequeño flujo escapa por las perforaciones, aireando el compost de manera homogénea desde el centro. La segunda configuración consistió en colocar la manguera de entrada hasta el fondo del frasco e introducir pequeñas piedras, separándolas del compost mediante una malla metálica con el objetivo de formar un colchón de aire que fomente la circulación de aire en el frasco de manera homogénea desde su parte inferior. A la primera configuración también se le colocó la malla metálica por si existiera la posibilidad de que una parte del aire no haya escapado por las perforaciones, así entonces se forme el colchón de aire en el fondo y el aire pueda distribuirse homogéneamente en el frasco. En la **Figura 4** pueden observarse los diagramas de cada configuración empleada.



Figura 4: Diagramas de las configuraciones utilizadas para airear el compost: (a) Configuración de la manguera perforada (b) Configuración del colchón de aire.

### C. Sistema Térmico

Los elementos utilizados para aumentar la temperatura del compost hasta llegar a 52°C tal como lo establece la norma ISO 14855, fueron cuatro resistencias eléctricas de 350W en forma de cilindro hueco (sunchos), de dimensiones 100x60 mm. Para la construcción del sistema térmico, se requirió de un Arduino UNO R3 para monitorear y controlar las temperaturas de los reactores, un protoboard para el armado del circuito, un variac para regular el voltaje de entrada, cinco sensores de temperatura DS18B20 donde cuatro de ellos tenían forma de sonda, para medir la temperatura de los reactores y de los sunchos, un relay de un solo canal normalmente cerrado para habilitar o deshabilitar el flujo de corriente hacia los sunchos, una resistencia de carbón de 4.7 kΩ para el circuito y una computadora que se dejó encendida en todo momento para alimentar al Arduino y para poder controlarlo de manera remota.

En primer lugar, se estudió la inercia del compost y la diferencia de temperatura entre la superficie del frasco y el interior del compost. Para ello, se colocaron 3 termocuplas: una entre el suncho y el frasco ( $T_{suncho}$ ), y otras dos dentro del compost, a una distancia de la pared del frasco igual a la mitad del radio ( $T_{costado}$ ) y otra en el centro del frasco ( $T_{centro}$ ), tal como se muestra en la **Figura 5**. Se tomaron mediciones de las 3 temperaturas con un termómetro digital TES 1300 durante casi 2 h mientras se alimentaba al suncho con un voltaje constante de 60 V utilizando el variac.

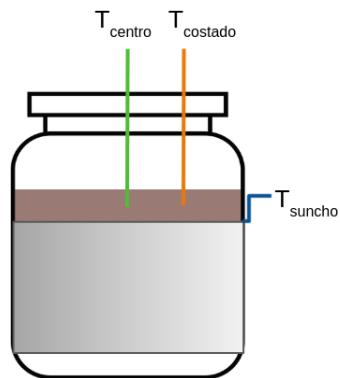


Figura 5: Esquema de la ubicación de las termocuplas para estudiar la inercia del compost.

Los sunchos, al ser simplemente resistencias eléctricas, cuando son alimentadas con voltaje incrementan la temperatura sin contar con un mecanismo de control. Sin embargo, esta metodología no funcionó para lograr alcanzar una temperatura de 52°C que fuera constante

en el tiempo. Por ello, fue necesario armar un sistema que controle la temperatura de los mismos. Se realizaron dos configuraciones, una con un solo reactor y otra con los cuatro reactores.

Para la primer configuración, se eligió un voltaje de 50 V del variac y lo se conectó al suncho a través de un relay controlado por el Arduino. Por otro lado, se conectaron dos sensores de temperatura al Arduino, uno en forma de sonda que se lo ubicó en el compost para medir su temperatura y el otro se lo ubicó entre el suncho y el frasco para medir la temperatura del suncho. En la **Figura 6** puede verse un diagrama del montaje experimental para el monitoreo y control de la temperatura de un solo reactor.

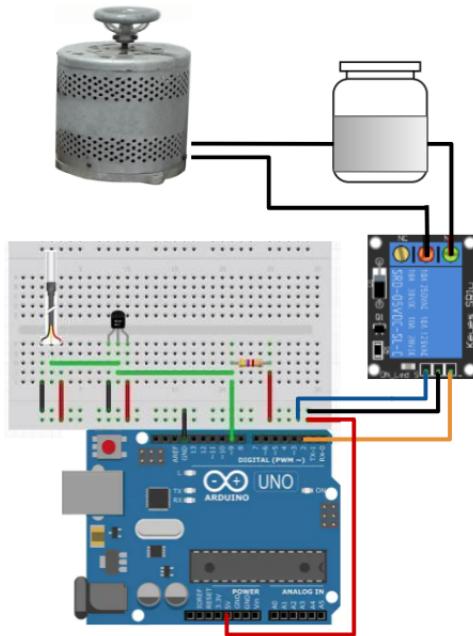


Figura 6: Esquema del circuito del monitoreo y control de la temperatura de un solo reactor. Ambos sensores de temperatura se encuentran sobre el protoboard en vez de en sus verdaderas posiciones (en el compost y en el suncho) para facilitar su entendimiento.

Se escribió un programa para el Arduino que permitiera que se abriera el relay si la temperatura del suncho era menor a la temperatura de corte  $T_c$ , y así, permitir el flujo de corriente hacia el suncho para que aumente su temperatura. Por otro lado, si la temperatura del suncho era mayor que la temperatura de corte entonces se cerraba el relay, cortando el circuito y por consiguiente, se dejaba de calentar el suncho. De esta forma, se realizó un circuito on/off alrededor de una temperatura de corte  $T_c$  a nuestro control, con pequeñas

fluctuaciones de temperatura que no se reflejaron en cambios en el compost. Luego, eligiendo de manera correcta la temperatura de corte se pudo fijar la temperatura del compost a la cantidad deseada de 52°C.

La razón por la cual se decidió utilizar la temperatura del suncho como parámetro on/off, utilizándolo como temperatura de corte en vez de la temperatura del compost, se debe a que el compost presenta una gran inercia térmica, mientras que el suncho, al ser un buen conductor térmico, posee menor resistencia y se calienta/enfría más rápidamente.

Además, se dispuso de una computadora conectada al Arduino que permaneció encendida todo el tiempo para que, por un lado, alimente el Arduino, y por otro, registre los datos de temperaturas de los sensores. Las mediciones de temperatura del suncho y del compost realizadas con el Arduino se almacenaron en archivos de texto usando un programa escrito en Python. El código de los programas utilizados se encuentra en el Apéndice A. Además, se utilizó el software TeamViewer que permitió la conexión remota desde otros dispositivos a la computadora a la que el Arduino estaba conectada. De esta manera, se pudo monitorear las temperaturas en todo momento, modificar la temperatura de corte cuando fuera necesario, y acceder a las mediciones de manera remota, pudiendo así dejar el sistema en funcionamiento y controlarlo sin tener que concurrir al laboratorio.

Una vez asegurada la estabilización en la temperatura deseada usando este sistema, se procedió a realizar el sistema cuádruple, como puede visualizarse en la **Figura 7**. Los cuatro sunchos se conectaron en serie y se utilizó como alimentación los 220 V del tomacorrientes (este voltaje se dividió equitativamente entre los sunchos ya que eran iguales). Además, al ser idénticos, presentan los mismos cambios de temperatura cuando se encuentran en las mismas condiciones y, por lo tanto, se calientan/enfrían de la misma manera. Por esta razón, se mantuvo el sistema on/off con un sensor de temperatura en uno de los sunchos, y así, se minimizó la cantidad de sensores en funcionamiento. Adicionalmente, se colocaron las cuatro sondas, una en cada uno de los reactores, para tener un monitoreo más seguro de la temperatura.

#### D. Medición del Dióxido de Carbono

La medición de CO<sub>2</sub> se realizó a través del procedimiento químico llamado titulación [8]. Cuando el NaOH captura CO<sub>2</sub> produce carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y agua, mediante la

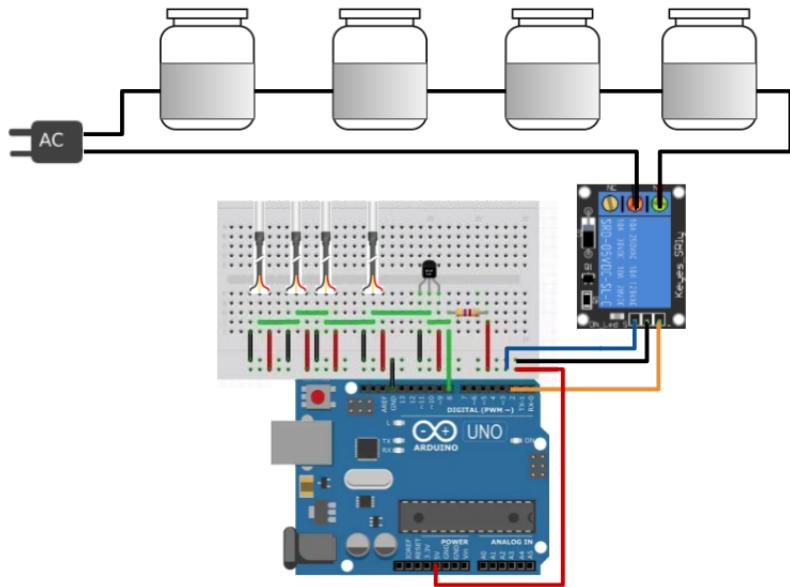
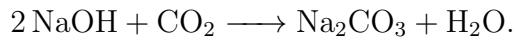


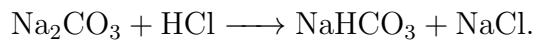
Figura 7: Esquema completo del sistema térmico. Los sensores de temperatura se encuentran sobre el protoboard en vez de en sus verdaderas posiciones (en el suncho y dentro de los reactores) para facilitar el entendimiento del esquema.

siguiente reacción



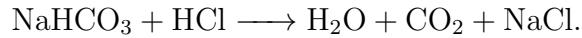
Para el proceso de titulación se tomó una muestra de 5 mL de la trampa de NaOH y se incorporó dos gotas del indicador fenolftaleína. Este indicador toma color rosa cuando el pH es mayor a 7 y es transparente cuando el pH es menor o igual a 7.

Paralelamente, se preparó una solución 0,53 M de HCl (Cicarelli) y se lo incorporó mediante una bureta a la muestra hasta observar el cambio de color rosa a transparente. En ese instante, el pH llegó a 7 y el HCl reaccionó con el carbonato para producir bicarbonato de sodio y cloruro de sodio, como muestra la siguiente reacción:



Mientras tanto, el exceso de NaOH remanente reacciona con el HCl produciendo también NaCl.

Luego, se le adicionaron dos gotas de naranja de metilo a la muestra y se le incorporó nuevamente HCl hasta que pasó de color naranja a rojo. Allí el pH resultó igual a 4 y el bicarbonato reaccionó con el HCl para formar CO<sub>2</sub>, agua y NaCl:



Así, la cantidad de HCl consumida en esta segunda reacción se utilizó para hallar la concentración del CO<sub>2</sub> atrapado, mediante la siguiente ecuación:

$$g\text{CO}_2 = V C_{\text{CO}_2} 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}, \quad (2)$$

donde V es el volumen del HCl consumido en la última reacción, mientras que la concentración de dióxido de carbono (C<sub>CO<sub>2</sub></sub>) está dada por:

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{C_{\text{HCl}} V_{\text{NaOH}}}{V_{\text{muestra}}}, \quad (3)$$

donde C<sub>HCl</sub> es la concentración de HCl, cuyo valor utilizado ha sido de 0.53 M, V<sub>NaOH</sub> es el volumen de la solución de NaOH que fue de 0.750 L y V<sub>muestra</sub> es el volumen de la muestra tomada, 5 mL.

Este procedimiento tiene como objetivo determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado (Eq. 2) para, a partir de la ecuación (1), obtener el porcentaje de biodegradabilidad de una muestra evaluada.

## V. RESULTADOS Y PUESTA A PUNTO

### A. Sistema Térmico

En la **Figura 8** se encuentra la evolución de la temperatura de las 3 termocuplas al ser alimentado el suncho con 60 V constante durante 2 hs.

Al comienzo del ensayo, durante aproximadamente 20 min, la temperatura del suncho crece muy rápidamente hasta alcanzar un régimen lineal, mientras que el compost tiene un crecimiento lento, debido a su inercia térmica, y luego crece de manera lineal a la par del suncho manteniendo una diferencia aproximada de 25°C entre *T<sub>costado</sub>* y *T<sub>suncho</sub>*. La diferencia entre *T<sub>costado</sub>* y *T<sub>centro</sub>* es de aproximadamente 10°C. En la **Figura 8** se puede observar que

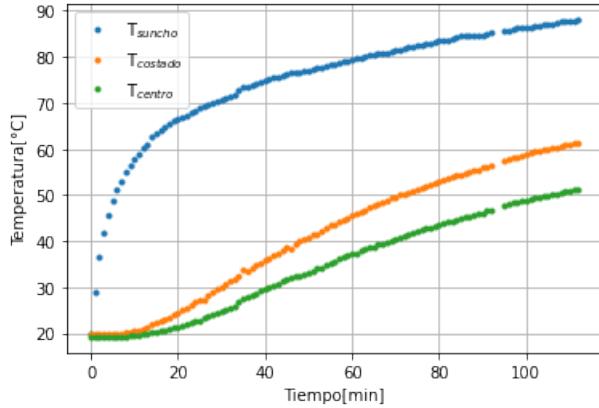


Figura 8: Evolución de la temperatura de 3 termocuplas ubicadas en el suncho ( $T_{suncho}$ ), en el centro del compost ( $T_{centro}$ ) y a una distancia de la mitad del radio del centro ( $T_{costado}$ ) al ser alimentado el suncho con 60 V.

el tiempo de respuesta térmica del compost para alcanzar 52°C es de aproximadamente 100 minutos, ya que el tiempo que tarda el centro del compost en alcanzar la misma temperatura que el suncho es de aproximadamente esta cantidad de tiempo. Es debido a esta diferencia temporal entre las temperaturas que se decidió usar como parámetro on/off a la temperatura del suncho en vez de la del compost.

Una vez armado el primer sistema descrito en la sección IV C, se lo dejó encendido sin muestra (solo con compost) en el reactor durante toda una noche y se monitoreó de manera remota usando TeamViewer. La evolución de la temperatura del compost y el suncho en el tiempo se encuentra en la **Figura 9**.

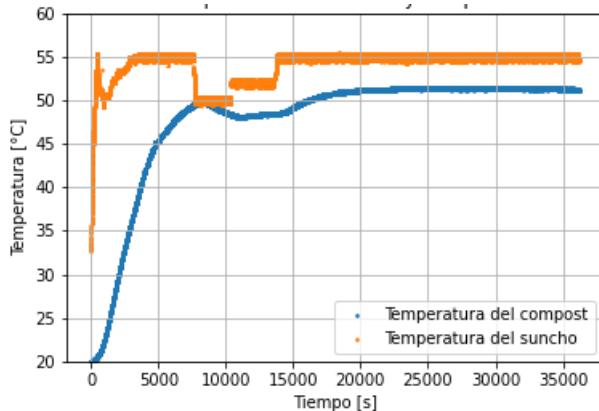


Figura 9: Evolución de la temperatura del suncho y del compost al ser controlados de manera remota.

Al principio se usó una temperatura de corte de  $T_c = 55^{\circ}\text{C}$ . Luego de alcanzar y mantener los  $55^{\circ}\text{C}$  se bajó la temperatura de corte de manera remota usando TeamViewer a  $50^{\circ}\text{C}$  para ver el efecto en el compost. Allí el compost había alcanzado los  $50^{\circ}\text{C}$  pero luego comenzó a disminuir la temperatura de manera gradual al haberse disminuido la temperatura del suncho. Luego, se aumentó la temperatura de corte a  $52^{\circ}\text{C}$  y luego de vuelta a  $55^{\circ}\text{C}$  y se lo dejó estabilizar durante toda la noche. Nótese que cada uno de estos cambios se evidencia en la rápida respuesta de la temperatura del suncho y, por consecuencia, el gradual ajuste de la temperatura del compost. Además, puede notarse que al final, cuando la temperatura del suncho se estabiliza en  $55^{\circ}\text{C}$ , la temperatura del compost se estabiliza en  $52^{\circ}\text{C}$  que es la temperatura deseada. Esta diferencia de  $3^{\circ}\text{C}$  se debe a pérdidas y puede cambiar según las condiciones ambientales. Es por esto que es importante monitorear y mantener un control constante de la temperatura de corte durante todo el proyecto para realizar posibles modificaciones de manera remota.

En condiciones ambientales de compostaje industrial, un material compostable puede demorar de 1 a 6 meses en biodegradarse. Para poner a punto el equipo de una manera rápida, se realizaron dos simulaciones.

## B. Simulación con bicarbonato de sodio

Con el objetivo de tener una fuente de  $\text{CO}_2$  para comprobar el correcto funcionamiento del equipo, en particular de las trampas de  $\text{NaOH}$ , se simuló al compost con una solución de bicarbonato de sodio, ya que el mismo es soluble en agua y, en presencia de un ácido fuerte, se descompone formando  $\text{CO}_2$  inmediatamente.

En primer lugar, se corroboró que las trampas de  $\text{NaOH}$  no disponían de  $\text{CO}_2$  atrapado. Se tomó una muestra de la trampa de  $\text{NaOH}$  y, luego de neutralizar hasta pH 7 con  $\text{HCl}$  utilizando fenolftaleína como indicador, se le incorporaron dos gotas de naranja de metilo y tomó inmediatamente el color rojo, indicando que efectivamente las trampas de  $\text{NaOH}$  no contenían  $\text{CO}_2$  atrapado. Luego, se preparó una solución de bicarbonato de sodio (Cicarelli) de manera tal que produzca 1.78 g de  $\text{CO}_2$ . Paralelamente se colocó en un reactor 500 mL de agua destilada en su contenido en lugar de compost, y se le adicionó  $\text{HCl}$  (Cicarelli) concentrado. Luego, con el aireador en funcionamiento y todos los prensacables cerrados a

excepción del correspondiente de la manguera de salida del reactor, se colocó a través de éste el bicarbonato de sodio y se lo cerró rápidamente.

Luego de una hora se tomó una muestra de 5 mL de la trampa de NaOH y se tituló. El volumen requerido de HCl fue 0.4 mL (con una incertezas menor al 1%), que utilizando la ecuación (2), correspondió a 1.40 g de CO<sub>2</sub> atrapado. La propagación de errores de la ecuación utilizada para el cálculo de CO<sub>2</sub> condujo a una incertezas menor al 0.5%.

La diferencia entre el CO<sub>2</sub> esperado (1.78 g) y el obtenido (aproximadamente 1.40 g) puede deberse a que el bicarbonato reacciona inmediatamente y libera CO<sub>2</sub>, por lo cual es probable que haya perdido una cantidad no despreciable antes de poder sellarlo rápidamente. Se realizó una única medición con la finalidad de poner a prueba las trampas sin desperdiciar el material con el que se contaba.

### C. Simulación con pasto

Con el objetivo de simular el proceso de biodegradación de un material, se utilizó pasto dado que es un material completamente natural y biodegradable. Se cortaron pequeños pedazos de aproximadamente 3 cm, se los mezcló con el compost en dos reactores con las dos configuraciones detalladas en la sección IV B, y se dejó el equipo en funcionamiento durante 24 hs. Luego, se tomó una muestra de 5 mL y se tituló. En ambos casos, fue requerido 0.2 mL de HCl, lo que equivale a una captura de 0.70 g (error menor al 0.5%) de CO<sub>2</sub>. Como consecuencia, no se detectaron diferencias relevantes entre ambas configuraciones.

## VI. CONCLUSIONES

Se logró armar un equipo capaz de medir la biodegradación de materiales en compost, siguiendo la norma ISO 14855.

Se armó un sistema térmico capaz de monitorear y controlar la temperatura del compost en todo momento y de manera remota exitosamente. A partir de las simulaciones realizadas con bicarbonato de sodio como reemplazo del compost y las trampas de NaOH, se demostró que el equipo captura CO<sub>2</sub> correctamente.

Las simulaciones llevadas a cabo con compost junto a pasto y con dos configuraciones distintas de aireado en el reactor, condujeron a resultados similares, sugiriendo un óptimo

comportamiento del equipo.

Con todas las partes del equipo probadas y con resultados exitosos, se logró construir un equipo con altas posibilidades de ser implementado para la determinación de toda clase de polímeros compostables.

A partir de los resultados obtenidos, se proyecta para la materia Laboratorio 7, analizar la biodegradabilidad de películas a base de almidón de mandioca elaboradas por la técnica de extrusión y calandrado, utilizando el equipo construido en el presente trabajo.

---

- [1] PEMRSG. Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2020. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>, 2021. Accedido: 5 de agosto, 2021.
- [2] A. Chamas, H. Moon, J. Zheng, Ya. Qiu, T. Tabassum, J. H. Jang, M. Abu-Omar, S. L. Scott, and S. Suh. Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9):3494–3511, 2020.
- [3] PlasticsEurope. Plastics - the facts 2020. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>, 2020. Accedido: 5 de agosto, 2021.
- [4] IUPAC. Biodegradable polymer. <https://goldbook.iupac.org/terms/view/BT07169>, 2014. Accedido: 5 de agosto, 2021.
- [5] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, and S. Ahmed. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology advances*, 26(3):246–265, 2008.
- [6] ISO 14855. Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions - method by analysis of evolved carbon dioxide. 2012.
- [7] EN 13432. Packaging - requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging. 2000.
- [8] G. Kale, R. Auras, S. P. Singh, and R. Narayan. Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. *Polymer testing*, 26(8):1049–1061, 2007.

## Appendix A: Código Usado Para El Sistema Térmico

El código utilizado para el monitoreo y control de la temperatura para el Arduino es el siguiente:

```
1 #include <OneWire.h>
2 #include <DallasTemperature.h>
3
4 // Pin donde se conecta el bus 1-Wire
5 const int pinDatosDQ = 2;
6 const int pinRelay = 7;
7
8 // Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
9 OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
10 DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);
11
12 void setup() {
13     // Iniciamos la comunicacion serie
14     Serial.begin(9600);
15     // Iniciamos el bus 1-Wire
16     sensorDS18B20.begin();
17
18     //Para el relay:
19     pinMode(pinRelay, OUTPUT); //conexion a S del relay
20 }
21
22 void loop() {
23     // Codigo para el sensor
24     sensorDS18B20.requestTemperatures();
25     // Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20
26     Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
27     Serial.print(",");
```

```

28 Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(1));
29 Serial.print(",");
30 Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(2));
31 Serial.print(",");
32 Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(3));
33 Serial.print(",");
34 Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(4));
35 Serial.print(",");
36
37
38 if(sensorDS18B20.getTempCByIndex(1) <= 55){
39     digitalWrite(pinRelay, HIGH); //turn relay ON
40     Serial.println("Prendido");
41 }
42 else{
43     digitalWrite(pinRelay, LOW); //turn relay OFF
44     Serial.println("Apagado");
45 }
46
47 delay(1000);
48 }
```

Este código mide la temperatura del compost y del suncho y en base a si la temperatura del suncho es mayor o menor que la temperatura de corte de 55°C abre o cierra el relay. Además, imprime el tiempo, las temperaturas y el estado del relay cada vez.

El código escrito en Python utilizado para almacenar lo que el Arduino imprime en consola es el siguiente:

```

1 import serial
2 import os
3 from datetime import datetime
4
```

```
5
6 arduino_port = "COM3" #serial port of Arduino
7 baud = 9600 #arduino uno runs at 9600 baud
8
9 ser = serial.Serial(arduino_port, baud)
10 print(f"Connected to Arduino port {arduino_port}")
11
12 now = datetime.now()
13 folder = f"measurements_{now.strftime('%d/%m/%Y_%H:%M:%S')}"
14
15 os.makedirs(f"./{folder}")
16 print(f"Created folder {folder}")
17
18 measurement = 0 #start at 0 because our header is 0 (not real data)
19 while True:
20
21     if measurement % 100 == 0:
22
23         fileName = f"./{folder}/data_{int(measurement / 100)}.csv"
24
25         print(f"{fileName} created")
26
27         file = open(fileName, "w")
28
29         file.write("Date_Time,Temp_Compost_1,Temp_Compost_2,Temp_Compost_3,
30 ,Temp_Compost_4,Temp_Suncho,Estado\n")
31
32         data = str(ser.readline())
33
34         now = datetime.now()
35
36         data = now.strftime("%d/%m/%Y_%H:%M:%S") + "," + data[2:-5] + "\n"
37
38         print(data)
39
40
41         file.write(data) #write data with a newline
42
43         measurement += 1
```

```
34     if measurement % 100 == 0 and measurement != 0:  
35         file.close()  
36         print(f"{fileName} completed")
```

Este código imprime en consola el tiempo, los valores de las temperaturas medidas por los sensores y el estado del relay cada vez que el Arduino hace una medición. Además, guarda estos valores en varios archivos de formato .csv y los separa en carpetas cuyo nombres son las fechas correspondientes para mantenerlos ordenados. Cada archivo contiene 100 mediciones. Se separaron las mediciones en muchos archivos ya que en caso de que algo falle (por ejemplo, un corte de luz) solo se pueden llegar a perder las últimas 100 mediciones y no todas.