

# Diseño y construcción de un biodigestor a escala de laboratorio para el estudio y el aprendizaje del comportamiento de un microorganismo anaerobio

S. Brito<sup>a</sup>, C. Mendieta<sup>b</sup>, S.O. Pérez<sup>a</sup>, A. Ramos<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Calidad Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, España

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería de Procesos de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, España

## RESUMEN

En el presente artículo se presenta el diseño, fabricación y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio a escala de laboratorio para el estudio del crecimiento de microorganismos en función de diferentes parámetros, donde se ha medido, en continuo, el potencial redox, el pH, la presión y la temperatura. Para ello se ha utilizado, en primer lugar un sistema compacto de control y toma de datos (Arduino one). Este diseño ha sido desarrollado para ayudar a los estudiantes de ingeniería a aprender y entender el funcionamiento de un biodigestor que, ayudado de las nuevas tecnologías, nos permite conocer diversas propiedades del sistema en cualquier momento, así como su evolución en el tiempo. De este modo se puede trazar curvas de propiedades y relacionarlas unas con otra para obtener un mejor conocimiento del estudio en su conjunto. En este contexto, se ha estudiado la relación existente entre la reacción óxido-reducción y la actividad microbiana con el fin de que el potencial redox pueda ser una forma de medir el crecimiento de los microorganismos en un medio anaerobio. Con todo ello, a través de estos parámetros, podemos aprender a controlar las reacciones que se producen dentro de un digestor para una mejor aplicación del mismo.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de energía a partir de la digestión anaerobia de desechos orgánicos está siendo una opción dentro del compromiso existente para mitigar el cambio climático, al mismo tiempo está considerada como una tecnología sostenible para el tratamiento de los mismos.<sup>8</sup> El proceso de digestión anaerobia ha sido conocido y aplicado desde la antigüedad, sin embargo ésta era comprendida en razón de sus productos finales y no en función de sus procesos.<sup>12</sup> La versatilidad de la digestión anaerobia aplicada como tecnología efectiva frente a ciertos retos fundamentales ha encontrado su utilidad en las industrias biotecnológicas.<sup>6</sup> A diferencia de los procesos aerobios donde el oxígeno disuelto puede ser medido en continuo, existe un gran desafío para procesos fermentativos en organismos anaerobios donde las tecnologías referente a procesos de control resultan hoy en día insuficientes.<sup>5</sup> Desde que la detección del pH se haya venido utilizando comúnmente en los procesos de fermentación, donde viene reflejado solamente la actividad del protón y por consiguiente no resulta sensible a pequeños cambios del metabolismo intracelular. El potencial redox conocido como oxidación reducción o potencial oxido-reducción, refleja todos los electrones transferido y refleja el metabolismo intracelular.<sup>5</sup>

Los recientes avances en el proceso de tecnologías analíticas permiten que los procesos de bioconversión complejos puedan ser controlados y descifrados. Pocos parámetros en este proceso se registran de forma rutinaria de forma continua e inmediata, tales como el pH, potencial redox, la tasa de producción de gas, y las tasas de flujo.

Dentro de este contexto, y debido a la gran cantidad de aplicaciones que se le están dando a los biodigestores anaerobios es por lo que sería necesario desarrollar estrategia para que los estudiantes de ingeniería pudieran entender y desarrollar su funcionamiento así como los parámetros que lo rigen, todo ello aplicado para diferentes situaciones. El aprendizaje de estas estrategias podrían lograrse con el uso de estos equipos o, mediante diseños

---

Para mayor información: (Enviar correspondencia a Saulo Brito Espino)  
Saulo Brito Espino: E-mail: saulo.brito101@alu.ulpgc.es, Teléfono: 928263269

experimentales llevados a cabo por estudiantes. Esta propuesta educativa está basado en estudios psicológicos teóricos publicados en numerosos artículos,<sup>1,2,7,11</sup> los cuales hacen hincapié en que el alumno puede reforzar su aprendizaje a través de un ambiente docente apropiado, así como a través del uso, construcción y diseño de equipos.

Descrita la importancia del proceso anaerobio y por consiguiente el control en todo momento del mismo, se opta por presentar el diseño y fabricación de un biodigestor bach anaerobio a escala de laboratorio, así como su puesta en funcionamiento mediante una aplicación práctica donde se ha introducido levadura de cerveza, (*Saccharomyces cerevisiae*), quedando sometido a un estricto proceso de control en continuo y cuyos resultados fueron comparados posteriormente con un modelo teórico planteado previamente.

El principal objetivo de este artículo es mostrar un diseño experimental a escala de laboratorio de un biodigestor anaerobio. Del mismo modo se plantea una serie de herramientas, *software* y *hardware* fáciles de usar y de bajo coste que permitirá ver a los estudiantes de ingeniería que se puede desarrollar elementos autónomos para controlar un elemento así como para transformar la información recibida en parámetros que luego puedan ser interpretados en un ordenador. En cuanto al objetivo específico de esta investigación es relacionar el proceso de digestión anaeróbica en un reactor por carga secuencial a escala laboratorio para un microorganismo conocido y con un sustrato preparado en laboratorio, con los perfiles de potencial de oxido reducción, pH, temperatura y presión absoluta.

## 2. MATERIAL Y MÉTODO

### 2.1 Esquema del reactor de laboratorio

El biorreactor (fig.1) diseñado se puede agrupar en tres partes bien diferenciadas: (1) Sistema de digestión; que incluye el digestor propiamente dicho, así como aquellos elementos que esté en contacto directo con el mismo (sensores, cable calefactor, suministro de carga y descarga, etc); (2) Sistema de control, circuitos y fuente de tensión; recibe los datos y envía las ordenes necesaria para el buen funcionamiento del sistema; (3) Sistema informático, Interfaz de comunicación y *software*.

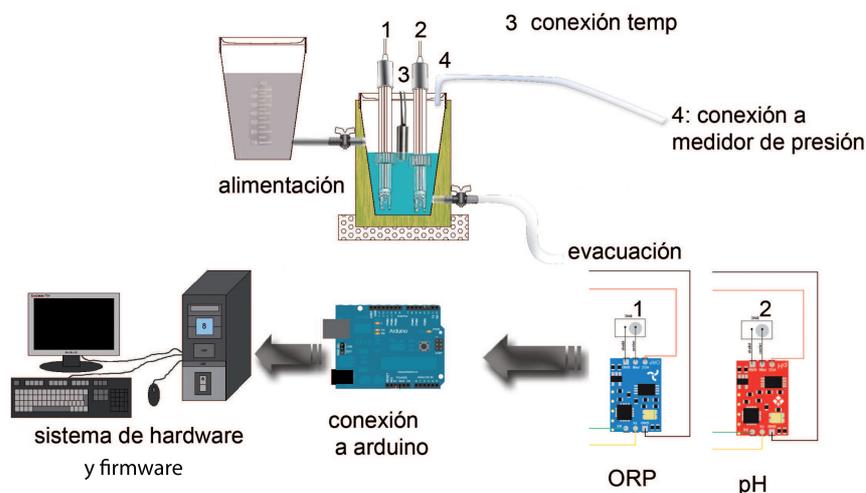


Figura 1. esquema del reactor de laboratorio diseñado

#### 2.1.1 Sistema de digestión

Formado por un recipiente hermético aislado, con un sistema de alimentación y evacuación dispuesto de modo que la mezcla quede garantizada en cada proceso de carga y descarga. En la parte superior del recipiente se dispone de una serie de sensores que se se pasa a definir a continuación:

- Sensor de pH: Sensor Científico Grado Silver / Silver cloruro de pH),<sup>10</sup> con una velocidad de respuesta del 95 % en un segundo
- Sensor de Potencial Redox,(E):Sensor de alta calidad de la marca Atlas Scientific<sup>9</sup> El modo de transmisión de datos es a través de un sistema integrado y con un simple protocolo de comunicación serial asíncrona nos da una respuesta inmediata del valor de E.
- Sensor de Presión Absoluta:Sensor de la marca Phidgets mod. 1141\_0 - Absolute Sensor de presión de gas 15 a 115 kPa.<sup>13</sup>Se trata de un sensor de alto nivel con entrada analógica , con entrada proporcional a la del medioambiente. La medición de la presión mínima para este sensor es 15 kPa. La fórmula empleada para traducir el valor del sensor a presión fue 1

$$Pressure(kPa) = \frac{SensorValue}{9.2} + 10.625 \quad (1)$$

- Sensor de temperatura: Se utilizaron dos termistores en miniatura NTC, marca Vishay para tomar lecturas de la temperatura externa e interna. Sus características principales viene descrita en la tabla 1.

Para el cálculo de la temperatura a partir de la medida analógica, teniendo en cuenta los valores resistivos en función de la temperatura facilitado por el fabricante, y con un algoritmo en Matlab obtenemos la ecuación;<sup>2</sup>

$$f(x) = 2.249 \times 10^{-5}x^2 + 0.06872x - 16.03 \quad (2)$$

Tabla 1. características termistor NTC, Vishay

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Valor de la resistencia a 25 °C	10 K	Ω
Valor de la tolerancia de R25	±3	%
B25/85 (Beta)	3984	K
Rango de temperatura de operación	-25 hasta 105	°C

### 2.1.2 Sistema de control y circuitos

En la fig. 3 se representa el esquema del circuito general donde se recoge todos los los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, así como la toma de datos para luego poder ser procesados.

Está compuesto por fuente de tensión de 12 V que alimenta al transistor, fuente de calor, termistores y sistema de agitación, placa arduino con microcontrolador, placa PWM a través de ella se controla la temperatura del biorreactor mediante un transistor, placa para los Sensores de temperatura, placas auxiliares de conexión y placas de sensores, resistencias, diodos y cableados

### 2.1.3 Sistema informático, interfaz de comunicación y *software*

En cuanto al sistema informático, se desarrolló un código de transmisión de datos en arduino para los sensores de pH, E, presión y temperatura. Los datos de salida han transferido al monitor serial de arduino para su comprobación y control, y seguidamente a través de la interfaz del programa *processing* para el registro de las lecturas del sensor.

### 2.1.4 Equipos auxiliares y materiales de laboratorio

Los equipos auxiliares fueron los siguientes: se utilizó un refractómetro marca Atago RX-7000 Alfa<sup>3</sup> para las mediciones, del producto de descarga, de índice de refracción y de los grados Brix (°Bx). ; Pesas de precisión. En cuanto a materiales se emplearon todos aquellos relacionados con la toma de muestras y medición de volúmenes (propio de un laboratorio), como puede ser; matraces, pipetas, cucharillas,etc.

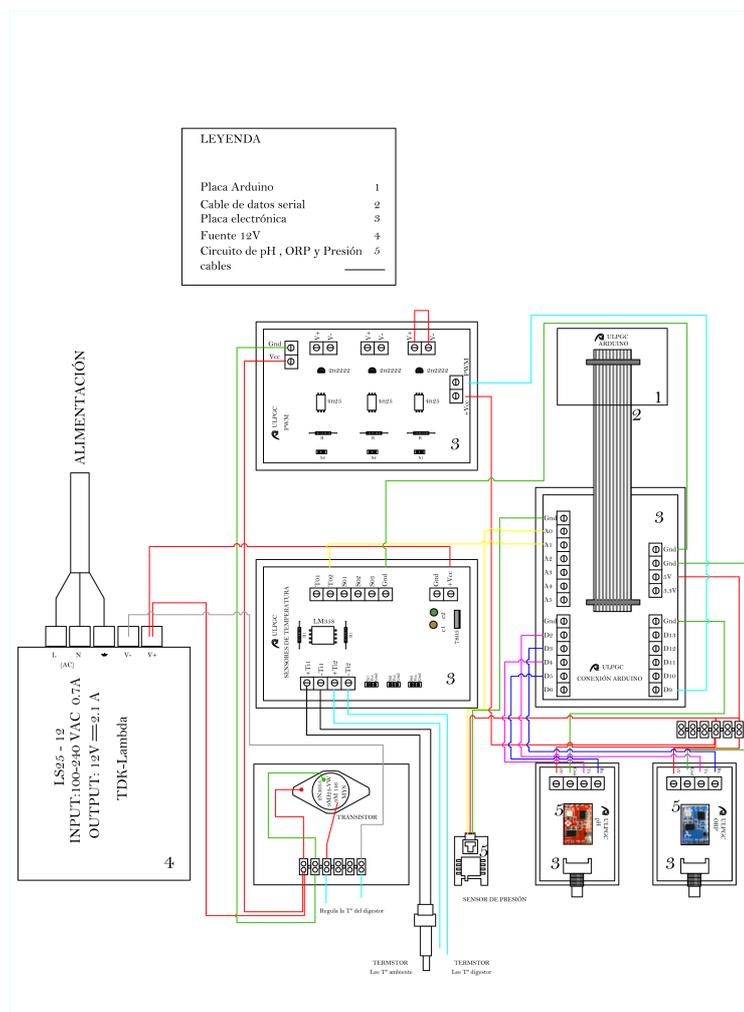


Figura 2. esquema del sistema de control y circuitos



Figura 3. esquema del sistema de control y circuitos

## 2.2 Preparación previa y ensayo

### 2.2.1 Preparación del sustrato

Para la preparación del sustrato se ha seguido el procedimiento descrito en la bibliografía<sup>4</sup>.

(1) Se preparó el sustrato y se comprobó su idoneidad. (2) Se midió los grados Brix y se verificó que estaban entre 17-20 grados. (3) Finalizado este proceso, se tomó 200 ml del mosto y en él, se adiciona la levadura (aproximadamente 2-4g/l). Aunque normalmente se precisa de una temperatura de activación de 37 °C, sin embargo se dejó a temperatura ambiente, dado que se ha comprobado con anterioridad que para la levadura de trabajo, el inóculo presenta actividad en estas condiciones.

### 2.2.2 Inóculo microbianos

Se empleó levadura de cerveza cuya especie incluye la *Saccharomyces cerevisiae* con un rendimiento en Kg de peso celular seco por kg de sustrato de 0.25-0.33.<sup>4</sup>

### 2.2.3 Contron y lectura de datos

A través del Arduino se controló la temperatura y se leyeron las señales de los sensores pH, E, presión absoluta, y temperatura (interna del digestor y externa del entorno). Estas señales fueron enviadas al ordenador donde se almacenaron. Una vez introducida toda la información, ésta se registró en un fichero, en el disco duro del ordenador.

## 3. RESULTADOS

Se muestra en la tabla 2 una representación media de los ensayos llevado a cabo en el biodigestor durante 5 semanas. Para el procesamiento de los datos se ha utilizado una herramienta informática de cálculo Scilab. Scilab es un *software* para análisis numérico, con un lenguaje de programación de alto nivel para cálculo científico. Con los datos obtenidos se han elaborado una serie de gráficas y se han expuesto las más relevantes en las fig

Tabla 2. ensayos realizados

periodo	fecha	volumen (carga/descarga) ml	grados brix			observaciones
			1º lectura	2º lectura	media	
1º	13-jun-14	300	20,30		20,30	
2º	18-jun-14	75	20,31	20,29	20,30	
3º	23-jun-14	50	20,33	20,24	20,26	adición NaOH (↑ alcalinidad)
4º	27-jun-14	50	20,42	20,40	20,41	adición HCl (↓ alcalinidad)
5º	01-jul-14	50	19,31	19,30	19,30	
6º	04-jul-14	50	18,51	18,51	18,51	
7º	08-jul-14	50	18,22	18,50	18,36	
8º	11-jul-14	50	18,50	18,51	18,50	

4,5,6,7,8,9,10,11.

La expresión de las reacciones de oxidación-reducción pueden expresarse mediante la ecuación de Nerst 3. Donde: n es el número de electrones transferidos y F la constante de Faraday (96.42 KJ/Voltios equivalente gramo).

$$Eh = Eo + 2.303 \frac{RT}{nF} \log \frac{\text{Productodeactividadesdeespeciesoxidadas}}{\text{Productosdeactividadesdeespeciesreducidas}} \quad (3)$$

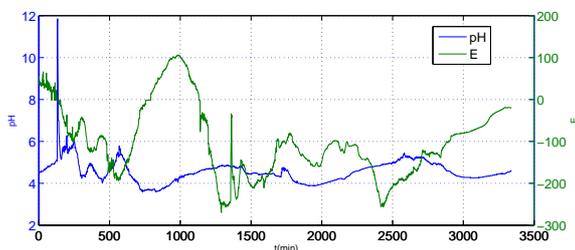


Figura 4. potencial redox y pH correspondiente al 1º intervalo

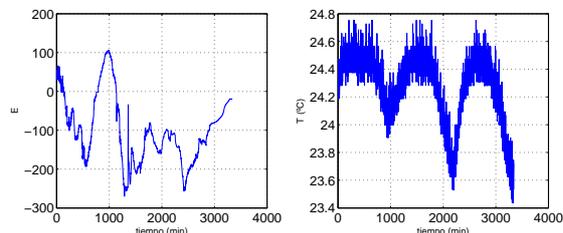


Figura 5. potencial redox y temperatura correspondiente al 1º intervalo

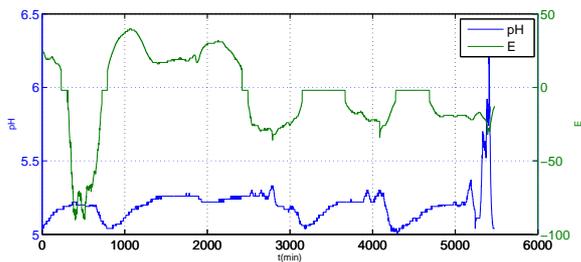


Figura 6. potencial redox y pH correspondiente al 2º intervalo

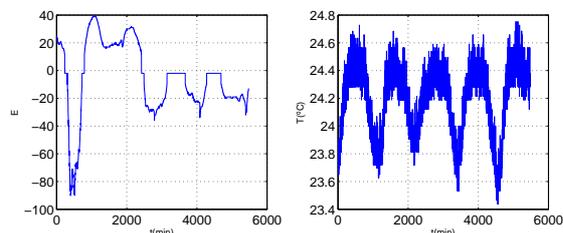


Figura 7. potencial redox y temperatura correspondiente al 2º intervalo

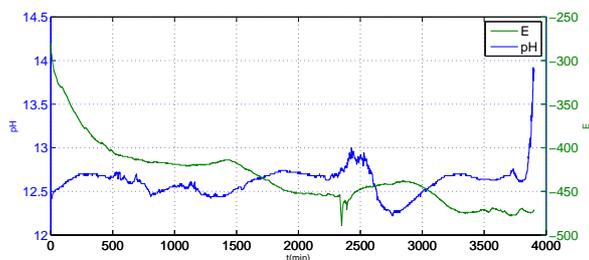


Figura 8. potencial redox y pH correspondiente al 3º intervalo

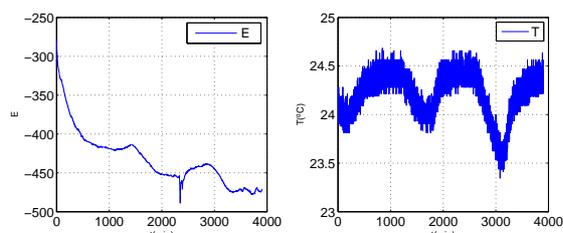


Figura 9. potencial redox y temperatura correspondiente al 3º intervalo

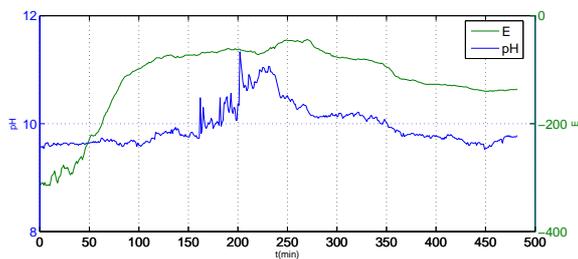


Figura 10. potencial redox y pH correspondiente al 4º intervalo

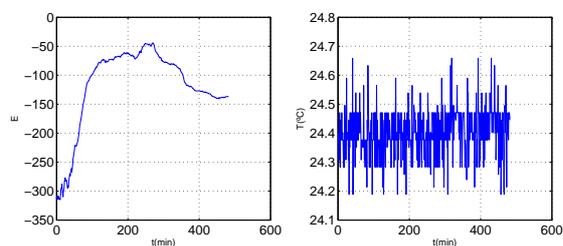


Figura 11. potencial redox y temperatura correspondiente al 4º intervalo

#### 4. CONCLUSIONES

El biodigestor fabricado funciona correctamente, permitiendo realizar ensayos a pequeña escala. Su uso en investigación y en docencia permitirá desarrollar nuevos proyectos de investigación del mismo modo que ayudará a los estudiantes de Ingeniería en su aprendizaje. Con este diseño será fácil determinar todos aquellos factores que pueden afectar al crecimiento del microorganismo anaerobio a través de la toma de datos en continuo por los sensores de Potencial Redox (E), pH, Temperatura y presión. Seguidamente con el posterior procesamiento de los datos es posible realizar gráficas para ser contrastada con un modelo teórico previamente planteado, al mismo tiempo puede compararse con las ecuaciones que rigen su comportamiento (ecuación de Nerst).

Por otro lado este diseño se ha apoyado en *software* flexibles y libres de fácil acceso, siendo todo ello una importante ventaja para los estudiantes ya que ofrece la posibilidad de poder adaptar este diseño experimental a cada caso concreto.

Los resultados demuestran que el diseño experimental es viable para el control y toma de datos de magnitudes relacionadas con el crecimiento de una bacteria anaerobia en un digestor.

Por último cabe recordar que el diseño y construcción de un biodigestor a escala de laboratorio debido a la viabilidad en cuanto a su economía y construcción es una herramienta al alcance de los estudiantes de ingeniería para el desarrollo de sus conocimientos y su aprendizaje

#### REFERENCIAS

- [1] E. M. Cano, J. G. Ruiz, and I. A. Garcia. Integrating a learning constructionist environment and the instructional design approach into the definition of a basic course for embedded systems design. *Computer Applications in Engineering Education*, 23(1):36–53, 2015.
- [2] I. A. Garcia and E. M. Cano. Designing and implementing a constructionist approach for improving the teaching-learning process in the embedded systems and wireless communications areas. *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 22(3):481–493, September 2014.
- [3] <http://www.atago.net/Spanish/download.htmlRX-7000i> Refractómetro digital automático. Atago. <http://www.atago.net/Spanish/download.html>.
- [4] G. Jagnow, W. Dawind, and M.O.L. Buesa. *Bioteología: Introducción con Experimentos Modelo*. Acribia, Editorial, S.A., 1991.
- [5] Chen-Guang Liu, Chuang Xue, Yen-Han Lin, and Feng-Wu Bai. Redox potential control and applications in microaerobic and anaerobic fermentations. *BIOTECHNOLOGY ADVANCES*, 31(2):257–265, MAR-APR 2013.
- [6] Michael Madsen, Jens Bo Holm-Nielsen, and Kim H. Esbensen. Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6):3141 – 3155, 2011.
- [7] Edis Mekic, Ivan Djokic, Sabina Zejnelagic, and Ana Matovic. Constructive approach in teaching of voip in line with good laboratory and manufacturing practice. *Computer Applications in Engineering Education*, 24(2):277–287, 2016.
- [8] Antonio Pantaleo, Bernardo De Gennaro, and Nilay Shah. Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of bari (italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20:57 – 70, 2013.
- [9] Atlas Scientific. Orp sensor. [https://www.atlasscientific.com/product\\_pagesensorsorpsensor.html](https://www.atlasscientific.com/product_pagesensorsorpsensor.html).
- [10] Atlas Scientific. orpatlas. In [https://www.atlasscientific.com/product\\_pagesensorsphsensor.html](https://www.atlasscientific.com/product_pagesensorsphsensor.html)<sup>9</sup>
- [11] Keyur Sorathia and Rocco Servidio. Learning and experience: Teaching tangible interaction & edutainment. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 64:265 – 274, 2012.
- [12] L. Taylhardat. El biogas. fundamentos e infraestructura rural. *Maracay. Instituto de Ingenieria Agrícola.Facultad de Agronomia U.C.V*, 1986.
- [13] Products for USB Sensing [www.phidgets.com](http://www.phidgets.com) and Control. Products for usb sensing and control.

