

# Diseño de un dispositivo mecatrónico de espectroscopia para el monitoreo de sistemas biológicos

LUIS FELIPE GARCÍA ARIAS <sup>(1)</sup>, VICTOR ALFONSO JARAMILLO PINEDA <sup>(2)</sup>,  
JHONATAN PINEDA <sup>(3)</sup>, JORGE ABEL CASTAÑEDA SALAZAR <sup>(4)</sup>

(1) feligar14@hotmail.com1

(2) victor.jaramillo@ucaldas.edu.co

(3) jhonatan.pizu@gmail.com

(4) jorge.castaneda@ucaldas.edu.co4

Programa de Ingeniería Mecatrónica  
Departamento de Física  
Universidad de Caldas  
Manizales, Colombia

# Diseño de un dispositivo mecatrónico de espectroscopia para el monitoreo de sistemas biológicos

---

## RESUMEN

---

*Palabras clave:*

***Espectrografía; bajo costo; raíces; sistemas biológicos; espectro visible; color; síntesis aditiva; PWM***

Existen diversos métodos de caracterización de proteínas que son usados en laboratorios para identificar la presencia de estas estructuras en todo tipo de muestras biológicas. A través de la manipulación de sistemas de iluminación se caracteriza la presencia de las diferentes cadenas de aminoácidos a lo largo de cada una de las etapas de vida de los sistemas biológicos, se verifica de esta manera la efectividad de las diferentes técnicas de preparación y cultivo de muestras. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema Mecatrónico de espectroscopia de bajo costo para la identificación de proteínas en las diferentes etapas del crecimiento de raíz. Se presenta el dispositivo como un método alternativo y eficiente a las técnicas convencionales, se propone una estructura mecánica, un sistema electrónico y una alternativa de control que se basan en la teoría de síntesis aditiva del color. El uso de las unidades básicas de iluminación propuestas permite la obtención de longitudes de onda entre los 400 nm y los 960 nm.

## I. INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de identificar diferentes compuestos (proteínas, carbohidratos, etc.) En los sistemas biológicos a encaminado a la búsqueda de diferentes formas de caracterización, debido a que los métodos cuantitativos y cualitativos tradicionales son complejos, demandan tiempo, mano de obra y son costosos [1].

La espectroscopia es una técnica rápida, no invasiva ni destructiva, y lo más importante exacta siempre y cuando se sigan los parámetros adecuados de calibración [5], de la muestra, el más utilizado es el método de espectrometría de reflectancia de infrarrojo cercano (NIRS por sus siglas en inglés) es el más utilizado por la industria alimenticia, farmacéutica, petroquímica como alternativa a los métodos químico y químico-biológicos tradicionales [2]. El método utiliza la región del espectro electromagnético que comprende longitudes de onda entre 700 y 2500 nanómetros (nm) [3], cuando una muestra es expuesta a la luz (energía), una parte de los fotones se trasmite a través de la misma y el resto es absorbido. La absorción de energía en la muestra hace que los enlaces entre Carbono e Hidrogeno (C-H), Oxígeno e Hidrogeno (O-H) y Nitrógeno e Hidrogeno (N-H) que son los principales constituyentes de la materia orgánica; vibren en diferentes formas [4] y esta interacción de energía con la materia está ligada a la ley de Beer- Lambert, que dice que la radiación absorbida por una muestra (A) es directamente proporcional a la absorbancia de esta al momento que ocurre la transmisión (T) de energía [5].

El objetivo principal de este trabajo nace de una necesidad en el laboratorio de biofísica de la Universidad de Caldas donde se están realizando investigaciones con semillas de maíz estimuladas magnéticamente, y se necesita un equipo de espectroscopia automático que pueda identificar cambios en las proteínas de las semillas después de ser estimuladas, además que monitoree el crecimiento de la radícula con una cámara en un determinado tiempo.

## II. MARCO TEÓRICO

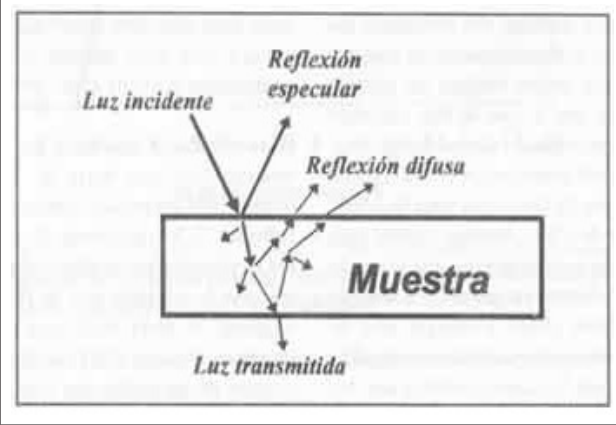
Existen numerosos trabajos que describen diferentes técnicas para evaluar la composición proteica de las semillas [6] [7] pero existen limitaciones con estas técnicas, especialmente con la valoración energética ya que son muy lentas. Los métodos in vitro en general permiten una mejor predicción, como el valor "D" (materia orgánica digestible como porcentaje de la materia seca) [8], sin embargo estos métodos dificultan hacer análisis masivos debido a que toman mucho tiempo.

Desde la década de los setenta se ha venido utilizando a nivel mundial la espectroscopia como una alternativa a los métodos químicos y químico-biológicos tradicionales, con un muy buen potencial para obtener estimaciones seguras y muy rápidas de la composición química de algunos sistemas biológicos [9], la interacción de la radiación con las moléculas foliares de las plantas controlan las reflectancias del espectro visible (VIS) y del infrarrojo (IR). Los componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos, aceites, agua), la morfología y la estructura de la planta influyen en la tendencia para absorber, transmitir y reflejar la radiación de diferentes longitudes de onda [10].

Cuando la luz incide sobre una muestra los fotones se transmiten a través de la muestra y el resto es reflejado o absorbido por algunos enlaces covalentes que se acoplan con la frecuencia o longitud de onda exacta de la radiación lumínica [11], al absorber energía, los enlaces de las moléculas vibran en dos formas, se extienden aumentando la distancia interatómica a lo largo del eje y entre dos átomos (frecuencias más altas) o se doblan (frecuencias más bajas) lo que produce un cambio en el ángulo del enlace entre dos átomos [12].

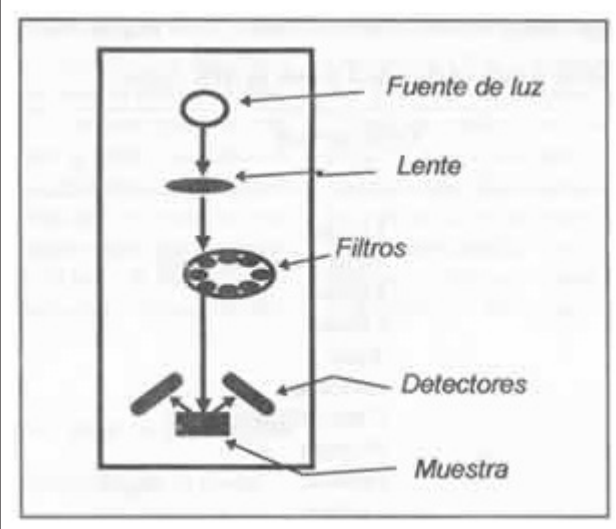
La energía total reflejada por la muestra es la suma de la reflexión especular (superficial o forma de espejo) más la reflexión difusa que es la temporalmente absorbida por la muestra [13] y solo esta proporciona información útil acerca de su composición (ver figura 1).

**Fig. 1.** Interacción de la luz con la muestra. Imagen tomada de: Alomar, Daniel y Fuchslocher, Rita. Fundamentos de la espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) como método de análisis de forrajes., Agro Sur, vol. 26, nº 1, pp. 88-104, 1998.



Existen instrumentos especialmente diseñados para realizar el proceso de espectroscopia que se basan en filtros especiales que al ser iluminados por una fuente emisora, solo dejan pasar una longitud de onda, al posicionar varios filtros se pueden generar diferentes longitudes de onda para irradiar la muestra (ver figura 2)

**Fig. 2.** Equipo NIRS de filtros fijos. Imagen tomada de: Alomar, Daniel y Fuchslocher, Rita. Fundamentos de la espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) como método de análisis de forrajes Agro Sur, vol. 26, nº 1, pp. 88-104, 1998.

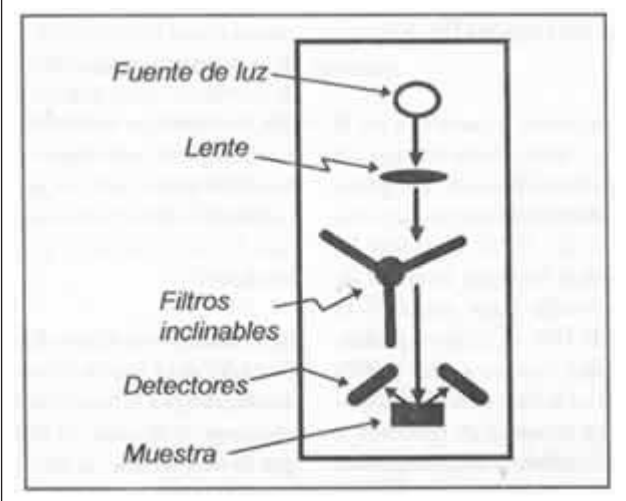


Este tipo de dispositivos tienen entre seis y veinte filtros posicionados que se pueden cambiar fácilmente

para generar una longitud de onda específica, uno de los primeros de este tipo que se comercializó fue un detector de analizador de granos que tenía 6 filtros para la medición de diferentes compuestos, agua (1940 nm), carbohidratos (2100 nm), proteínas (2180 nm) y aceite (2310 nm) [14].

Otro tipo de instrumentos que fueron utilizados en los comienzos de la espectroscopia poseían de tres a siete filtros, se montaban en un eje pivotado que al girarlos provocaban una inclinación del filtro, cambiando el ángulo de la luz que incidía sobre el provocando un cambio de la longitud de onda que pasaba (ver figura 3).

**Fig. 3.** Equipo NIRS de filtros móviles. Imagen tomada de: Alomar, Daniel y Fuchslocher, Rita. Fundamentos de la espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) como método de análisis De Forrajes., Agro Sur, vol. 26, nº 1, pp. 88-104, 1998.



### III. MÉTODOS Y MATERIALES

Para desarrollar el dispositivo de espectroscopia se tuvieron en cuenta varios parámetros que se discutieron con el usuario final que es el laboratorio de biofísica de la Universidad de Caldas; como funcionalidad, autonomía, control y tamaño.

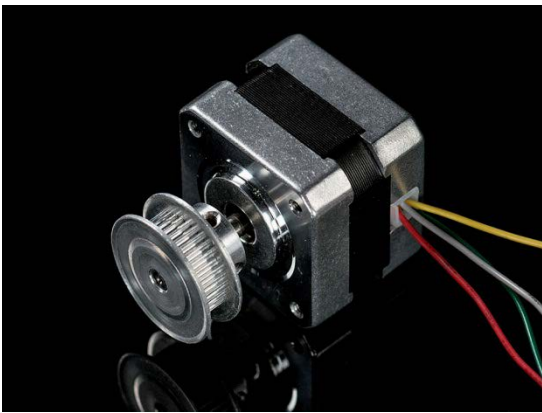
Se planteó para la construcción utilizar un material liviano, un sistema electrónico y de control basado en Arduino, leds RGB e Infrarrojos, sensores de color TCS3200, sensor de luminosidad LX1972 y motores paso a paso, además de un microscopio óptico USB se sirve para realizar las capturas del sistema biológico.

Las etapas del diseño se explican individualmente a continuación.

#### A. Diseño Mecánico del dispositivo

Al momento de desarrollar posibles soluciones para la problemática presentada, se decide empezar una investigación de formas, métodos y herramientas para lograr una solución viable y rápida de implementar, con esto en mente se reunió información sobre mecanismos básicos de movimiento; el principio de movimiento sería moverse en los tres ejes de posición para generar una mayor flexibilidad de los experimentos, como lo hacen las actuales impresoras 3D, [15] de igual manera se necesitaba realizar acercamientos y barridos más uniformes, con todo esto claro se aplica el método de bandas y poleas dentadas, modelo aplicado en la máquina anteriormente mencionada (Figura 4).

**Fig. 4.** Motor paso a paso con polea dentada. Imagen tomada de: [http://www.330ohms.com/Polea-de-aluminio-dentada-GT2-eje-5mm-36-dientes\\_p\\_592.html](http://www.330ohms.com/Polea-de-aluminio-dentada-GT2-eje-5mm-36-dientes_p_592.html)



Este conjunto de componentes permite tener un control preciso en cuanto a posición y dirección del sistema gracias a la relación aplicada entre la polea dentada y el eje del motor [16] reduciendo el movimiento que aporta cada paso del motor empleado. Con el mecanismo de movimiento seleccionado, se realiza el diseño para la ubicación del microscopio y los dispositivos de luz y sensorica que se empleara en la medición de las raíces, esto arroja la distribución exacta de los dispositivos a utilizar (figura 5), además de la posibilidad de alternar configuraciones de los mismos y comprobar su funcionamiento.

**Fig. 5.** Diseño final del dispositivo sin estructura de soporte



Con todos los componentes asignados además del tipo de mecanismo para aplicar el movimiento, se realizó una consulta para seleccionar un material adecuado para la construcción de la estructura de la máquina se tuvo en cuenta el ambiente al que será expuesto y el tipo de trabajo que desarrollará, el material que se seleccionó fue el aluminio estructural el cual es un material apropiado para la utilización en el laboratorio, dado que la exposición a múltiples sustancias químicas no genera ningún tipo de corrosión, se opta por utilizar una estructura cuadrada de aluminio (figura 6) la cual es utilizada en montajes a nivel industrial, esta estructura cuenta con un área transversal de  $4 \text{ cm}^2$ .

**Fig. 6.** Aluminio estructural. Imagen tomada de: <http://aluminioindustrial.mx/>

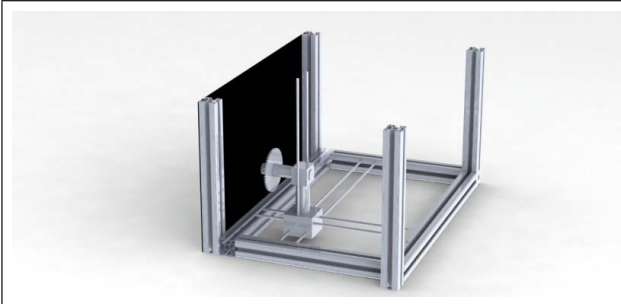


Todos los componentes de diseño se realizan bajo la implementación de software CAD (Solid Works) [17], con el cual se cuenta en la universidad. Gracias a este software se realizó una amplia gama de pruebas y modificaciones sin necesidad de construir

prototipos y no generar pérdidas de tiempo y dinero en dicha construcción.

Al terminar el diseño de la estructura (figura 7) se le adiciona un revestimiento negro mate para obtener las lecturas más exactas por parte de los sensores además de una fácil distinción de las raíces por parte del microscopio.

**Fig.7.** Diseño final con estructura.



### *B. Diseño electrónico*

El sensor empleado para la detección de color (TCS3200) (ver figura 8), realiza un barrido del espectro seleccionado. Posee un conjunto de arreglos con fotodiodos de diferentes tipos que se activan con una exposición determinada al espectro visible. A partir del sensor se obtiene un tren de pulsos cuya frecuencia varía de manera proporcional a las componentes de color a medir. Para obtener máxima resolución se mide la cantidad de pulsos que recibe el microcontrolador en un periodo de tiempo.

**Fig. 8.** Sensor de color TCS3200. Imagen tomada de: <http://reibot.org/2011/07/06/tcs3200/>



El sensor (LX1972) (ver figura 9) que será empleado para la medición de la luminosidad es un comparador el cual arroja una curva de acuerdo a la cantidad de la intensidad de la luz que es sensada, para

ello se empleó una entrada analógica del Arduino, de allí por software se escala para obtener el valor y así permitir visualizar esta variable.

**Fig. 9.** Sensor de luminosidad LX1972. Imagen tomada de: <http://es.aliexpress.com/w/wholesale-eye-sensitivity.html>



Dado que este sistema requiere la implementación de infrarrojo y ultravioleta en el método de espectrografía, se hizo evidente la necesidad de implementar en la etapa de control un sensor que pudiese hacerse cargo de la lectura de estas dos importantes variables, así que se emplea el sensor (TSL257) (ver figura 10) que arroja una curva con este valor, para este caso se empleó de nuevo una entrada de señal analógica para procesar los valores arrojados por este sensor.

**Fig. 10.** Sensor TSL257 convertidor de luz en tensión. Imagen tomada de: <http://shop.openenergymonitor.com/tsl257-optical-pulse-sensing-kit/>



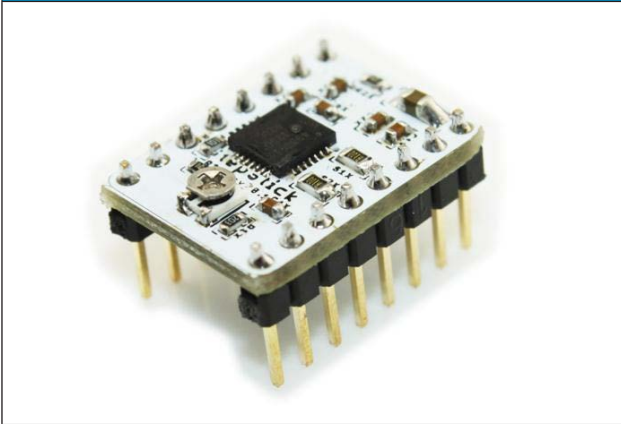
Para el control de los motores paso a paso, se seleccionó la tarjeta A4988 (ver figura 12), que permite una resolución de hasta 1/16 de por paso, posee regulación de corriente y protecciones contra sobretensión, sobrecorriente y corto a tierra y de carga.

Después de realizar la adquisición y eventual procesamiento se pasa a la exhibición y publicación de las variables mediante los puertos de visualiza-



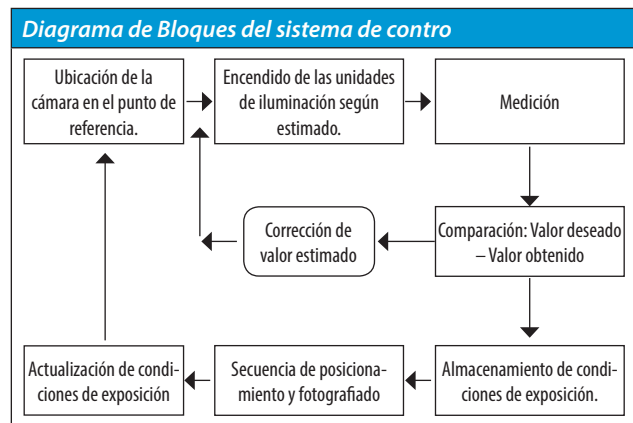
ción con los que cuenta el Raspberry pi (HDMI), este método se empleó debido a que en el laboratorio se contaba con una pantalla de conexión HDMI y solo se necesitaba un cable para su conexión, se encontraron en el mercado display para el uso con este dispositivo pero era de poca capacidad de visualización y no permitía exponer los datos obtenidos al usuario final del dispositivo de espectroscopia.

**Fig. 12.** Controlador de motores paso a paso A4988. Imagen tomada de: [http://www.dx.com/es/p/stepstick-a4988-stepper-motor-driver-module-white-black-186465#.VgHCTd9\\_Oko](http://www.dx.com/es/p/stepstick-a4988-stepper-motor-driver-module-white-black-186465#.VgHCTd9_Oko)



### C. Sistema de control.

Para el sistema de control se establece un lazo de realimentación entre el sistema de iluminación y los sensores de color y luminosidad. Se selecciona como unidad de procesamiento una Raspberry Pi B+ para fines de expansión, a la que se añade un Arduino micro para hacer uso de las unidades PWM y convertidores análogo digital. Dado el funcionamiento de los sensores y las señales que estos generan se vio la necesidad del uso de una tarjeta Arduino como tarjeta de adquisición de datos. El uso de componentes RGB siguiendo la teoría del color se implementa en el sistema de Control. Para obtener longitudes de onda que se aproximen al ultravioleta cercano y al infrarrojo cercano, se tratan las fuentes como ondas y se realizó un estimado de la longitud de onda presente. Para registrar la longitud de onda y la intensidad a la que se somete la muestra al momento de cada serie de fotos se establece un algoritmo que se presenta en la figura.



El conjunto de sensores se ubica sobre una esquina del tablero en el cuál serán colocadas las muestras y se configura como punto de referencia del sistema. Para cada una de las longitudes de onda seleccionadas, la cámara se posiciona sobre el punto de referencia y se ajustan las intensidades y combinaciones de las fuentes de iluminación. Luego de ajustar las características de exposición a las que se someterá la muestra, el dispositivo de adquisición de imágenes realiza un barrido de la muestra. El proceso se repite para cada una de las condiciones de exposición programadas para cada sesión de monitoreo.

## IV. ANÁLISIS DE VIABILIDAD

El diseño y la construcción del equipo Mecatrónico de espectroscopia, se basó en un estudio de viabilidad, pertinencia y eficiencia, además se analizó la componente económica, encontrando que el sistema propuesto se caracteriza por el bajo costo y por su buen rendimiento, debido a que se diseñó teniendo en cuenta los parámetros que proporcionó el usuario final que es el laboratorio de biofísica de la Universidad de Caldas, cabe resaltar que dicho laboratorio no contaba con un equipo de este tipo.

Este nuevo equipo brindará al laboratorio de biofísica la oportunidad de obtener datos acertados en la detección de proteínas en las semillas de maíz estimuladas magnéticamente, además servirá como ejemplo para nuevas aplicaciones donde se unifiquen los conocimientos de ingeniería y automatización, para dar soluciones a problemáticas que se presenten en las diferentes áreas del conocimiento.

El dispositivo de espectroscopia diseñado tiene como valor agregado la visualización por medio de una pantalla HDMI las condiciones a la que están expuestas las muestras en cada una de las fotografías capturadas.

### V. CONCLUSIONES

Se obtuvo un diseño funcional y de bajo costo de un sistema de espectroscopia, que cumple con los parámetros y las necesidades del análisis que se llevarán a cabo con este equipo.

Se plantea como trabajo futuro el desarrollo de una aplicación móvil que se comuniquen con el equipo para el control de manera remota y el envío de información en tiempo real.

### REFERENCIAS

- [1] I. Murray, «Near Infrared analysis of forages,» *Studies in the Agricultural and Food Sciences*, pp. 141-156, 1986.
- [2] P. Williams, «Application of near infrared reflectance spectroscopy to analyse cereal grains and oilseeds,» *Cereal Chem*, pp. 561-576, 1975.
- [3] E. a. F. Deaville, «Near Infrared (NIR) spectroscopy: an alternative approach for the estimation of forage quality and voluntary intake,» *Forage Evaluation in Ruminant Nutrition*, pp. 301-320, 2000.
- [4] D. a. D. E. Givens, «The current and future role near infrared reflectance spectroscopy in animal nutrition,» *A review. Aust. J. Agric*, vol. 50, pp. 1131-1145, 1999.
- [5] J. M. C. Urzua, «Calibración de espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) para medición de la composición química de praderas (muestras secas) en la Décima Región,» *Universidad Austral DE Chile, Facultad de ciencias Agrarias, VALDIVIA - CHILE*, 2005.
- [6] D. Givens, «The digestibility and metabolisable energy content of grass silage and their prediction from laboratory measurements,» *Animal Feed Science and Technology*, vol. 24, n° 1, pp. 27-43, 1989.
- [7] D. Givens, «The principles, practices and some future applications of near infrared spectroscopy for predicting the nutritive value of foods for animals and humans,» *Nutrition Research Revs*, vol. 10, n° 01, pp. 83-114, 1997.
- [8] Collins, Mary G. Dowman and Frank C, «The use of enzymes to predict the digestibility of animal feeds,» *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 33, pp. 689-696, 1982.
- [9] R. F. Daniel Alomar, «Fundamentos De La Espectroscopia De Reflectancia En El Infrarrojo Cercano (Nirs) Como Método Del Análisis De Forrajes,» *Agro Sur*, vol. 26, n° 1, pp. 88-104, 1998.
- [10] J. A. d. I. C. Durán, «Índices Espectrales En Pimiento Para El Diagnóstico,» *Terra Latinoamericana*, vol. 29, n° 3, pp. 259-265, 2011.
- [11] I. Murray, *Forage Analysis by Near Infra-Red Reflectance Spectroscopy*, British Grassland Soc: Sward Measurement Handbook Second Ed, 1993.
- [12] J. J. Workman, «Interpretive Spectroscopy for Near Infrared,» *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 31, n° 3, pp. 251-320, 1996.
- [13] A. M. C. a. G. A. Davies, «Review: Near infra-red analysis of food,» *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 22, n° 3, pp. 191-207, 1987.
- [14] K. Norris, «A definition of wheat hardness using near infrared reflectance spectroscopy,» *Department of Agriculture, Agriculture Handbook*, vol. 34, n° 9, pp. 12-17, 1989.
- [15] Barahona, E. A. T., Medina, J. X. L., & Díaz, E. T., «Sistema De Posicionamiento Aplicado A La Técnica De Impresión 3d Modelado Por Deposición Fundida,» *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, vol. 3, n° 1, 2013.
- [16] Norton, R. L., García, G. S., & Castelló, C. D. L. M. C.. Norton, *Diseño de máquinas (Vol. 1)*, México: Prentice Hall, 1999.
- [17] Jaramillo Pineda, V. A., Pineda, J., & Garcia Arias, L. F, «Design of an automatic voice controlled system and remote control,» *IEEE EXPLORA*, pp. 1-5, 2014.