

Arduino una Herramienta Accesible para el Aprendizaje de Programación

VARGAS-Manuel†, CASTILLO-Georgina, SANDOVAL-Juan & BRAMBILA-Alfredo

Universidad Politécnica de Altamira

Recibido 7 de Julio 2015; Aceptado 14 de Septiembre, 2015

Resumen

En el presente documento se aborda la aplicación de la plataforma Arduino en el área de robótica, específicamente en el armado y programación de robots móviles. Lo anterior con el fin de desarrollar la lógica de programación en los alumnos de nuevo ingreso de la carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información de la Universidad Politécnica de Altamira. Buscando una manera atractiva de cómo enseñar programación se llegó a la conclusión de impartir un taller, en el cual los alumnos aprendan a utilizar Arduino, armar y programar robots móviles. Derivado del taller se han construido tres robots en los cuales se realizaron las prácticas de: Control motriz, Evasión de obstáculos y Control motriz mediante Bluetooth. Además se tiene un proyecto de generación de mapas para establecer desplazamientos en ambientes desconocidos. Como trabajo a futuro se planea realizar la construcción de una librería de código para el control motriz del robot. Es importante que el área de la robótica sea considerada prioritaria para el desarrollo del país, pues existe gran talento en los jóvenes mexicanos.

Arduino, Robótica, Programación, Robots móviles, Sensores

Citación: ARGAS-Manuel, CASTILLO-Georgina, SANDOVAL-Juan & BRAMBILA-Alfredo. Arduino una Herramienta Accesible para el Aprendizaje de Programación. Revista de Tecnología e Innovación 2015, 2-4:810-815

Abstract

In this paper presents the application of Arduino platform in the Robotics area, specifically in the assembly and programming of mobile robots. This in order to develop programming logic in the new students of Engineering in Information Technology from the Polytechnic University of Altamira. Looking for an attractive way how to teach programming is concluded to teach a workshop in which students learn to use Arduino, assemble and program mobile robots. Derived from the workshop the students have been built three robots in which practices were performed: motor control, obstacle avoidance and motor control via Bluetooth. In addition we have a generation project of displacement maps in unknown environments. In the future we planned construction a library of code for to motor control. It is important that the area of robotics is considered a priority for the country's development, because there is great talent in young Mexicans.

Arduino, Robotics, Programming, Mobile Robots, Sensors

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La programación es una actividad que requiere tener ciertos conocimientos generales y de matemáticas, pero es fundamental poseer lógica de programación sobre todo lo demás (de Melo, de Melo Filho, de Oliveira Feliciano, Saraiva Carvalho, Almeida Brito, & Gomes, 2014). Esta habilidad se desarrolla principalmente con la revisión de ejemplos y su discusión en clase. Sin embargo la abstracción que este proceso lleva debido a la naturaleza intangible del software dificulta la asimilación de los conocimientos. Los jóvenes actualmente son presa de una gran cantidad de distractores: Televisión, Video Juegos, Redes Sociales, etc., tener su atención se vuelve una tarea difícil para los profesores, por lo cual se buscó una forma más tangible para entender la lógica de programación y se consideró usar una plataforma diferente de la tradicional, la plataforma elegida fue Arduino.

Arduino es un proyecto de Código Abierto (Open Source) que posee una plataforma de hardware y un IDE (Integrated Development Environment). Esta plataforma de hardware está integrada por una variedad de tarjetas programables, de las cuales la más básica y accesible es Arduino Uno, la cual no solo es la tarjeta más accesible desde el punto de vista económico, también es la más usada para fines diversos, edades e intereses (Herger & Bodarky, 2015).

Arduino Uno está integrado por un microcontrolador ATmega328, 14 pines que funcionan como Entrada/Salida, 6 pines de entrada analógica, una memoria flash de 32 Kb, SRAM de 2 KB, EEPROM de 1 Kb, 7-12 V de entrada y una velocidad de reloj de 16 Mhz, en tan solo 68.6 X 53.4 mm de tamaño de la tarjeta como se puede observar en la Figura 1.

La plataforma Arduino se programa mediante un IDE del mismo nombre que es descargada de forma gratuita desde la página del autor, es un ecosistema basado en Wiring, y usa el lenguaje de programación basado en C (Herger & Bodarky, 2015).

La versatilidad de Uno radica en que existe una gran cantidad de elementos electrónicos que se pueden combinar con la tarjeta: sensores, “shields” y equipo electrónico diverso. El costo de los componentes que son compatibles con Arduino no es elevado, por lo que están al alcance del público en general y escuelas que no tienen recursos para adquirir equipo más caro.



Figura 1 Tarjeta de desarrollo Arduino Uno

Arduino Uno es una tarjeta programable, lo cual se hace desde una computadora y mediante un cable USB el programa es cargado en la tarjeta y grabado en su memoria, por lo que tiene independencia de la computadora siempre y cuando se le administre energía. Con el conocimiento anterior se propuso un taller en el cual se enseñó el uso de la tarjeta Arduino en el Programa de Ingeniería en Tecnologías de la Información, enfocado principalmente al armado y programación de robots móviles.

Los robots móviles como su nombre lo indica son dispositivos que se desplazan alrededor de su entorno, pueden viajar en la tierra, sobre la superficie de los cuerpos de agua, debajo del agua y en el aire. Contrastan con los robots manipuladores de base fija usados en manufactura: ensamble de automóviles, de aviones, partes electrónicas, soldadura y pintura (Cook, 2011).

La robótica en México ha tenido un considerable crecimiento en los últimos años, a tal grado de ganar diversas competencias a nivel mundial, pero todo esto se ha realizado con muy poco apoyo económico. A pesar de todo, alumnos y profesores siguen adelante con investigaciones en el área, tanto que México es considerado un país importante en el tema, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) considera que México debe buscar ser potencia por lo menos en mini-robótica (Valencia Juliao, 2015).

Taller de Robótica

Por lo mencionado anteriormente se creó un taller enfocado en robótica, específicamente en robots móviles que se desplazan en tierra. A este proyecto se le llamó “Taller de Robótica” el cual sirvió para generar la lógica de programación en los alumnos y en el camino cubrir algunos temas de: Electrónica, Armado y programación de robots móviles. En la Figura 2 se observan estudiantes del taller.



Figura 2 Estudiantes en el Taller de Robótica

El taller fue dividido en dos Fases: Fase 1 Arduino, Fase 2 Armado y programación de robots móviles.

Fase 1 Arduino

Esta fase que se lleva a cabo con los alumnos del primer cuatrimestre, implica la enseñanza de conocimientos básicos de Arduino como es la introducción a la plataforma y programación. Las actividades consisten en prácticas donde se cubren los siguientes temas: Estructura básica de un programa en Arduino, Configuración de pines, Aprendizaje de instrucciones de entrada-salida, Sensores (Ultrasónico, Infrarrojos), Servomotores, Motores y Comunicación (Bluetooth, Infrarrojo).

En la Figura 3 se muestra el resultado de las prácticas de sensores.

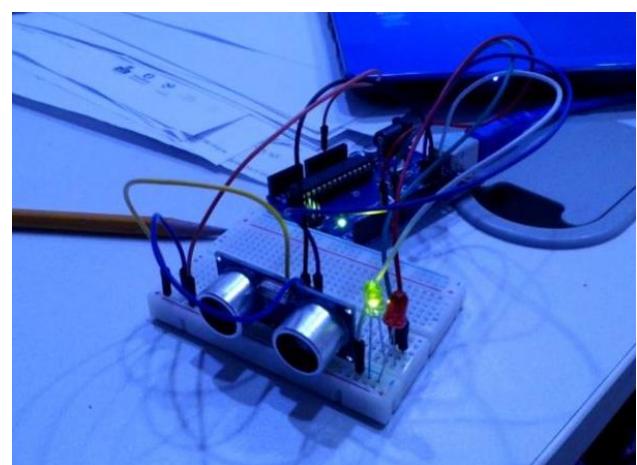


Figura 3 Práctica de ultrasónico como sensor de proximidad.

Fase 2 Programación y Armado de Robots Móviles

La segunda fase consiste en el aprendizaje de lo que integra un robot móvil y su programación, entre los temas revisados están: Sensor Shield, Motores, Puente H, Sensores, Armado del robot, Práctica control motriz, Práctica evasión de obstáculos y Práctica control motriz mediante Bluetooth. Al término del taller el alumno adquiere los conocimientos acerca de los componentes básicos de un robot móvil, cómo armarlo y cómo programarlo. En la Figura 4 puede observarse un robot móvil armado en el taller.

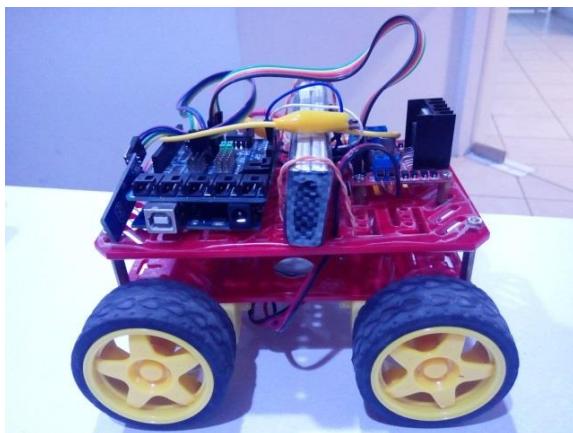


Figura 4 Robot móvil

A continuación se mencionarán algunos proyectos derivados del taller de Robótica.

Robots Móviles

Se cuentan con 3 robots móviles los cuales se utilizan en las prácticas para su armado. Los robots constan de un marco comercial de un vehículo de 4 ruedas controladas por un puente H (Ver Figura 5). Un puente H es un circuito electrónico que se utiliza para el control de motores, regularmente como el L298 controla solo dos motores (Ver Figura 6).

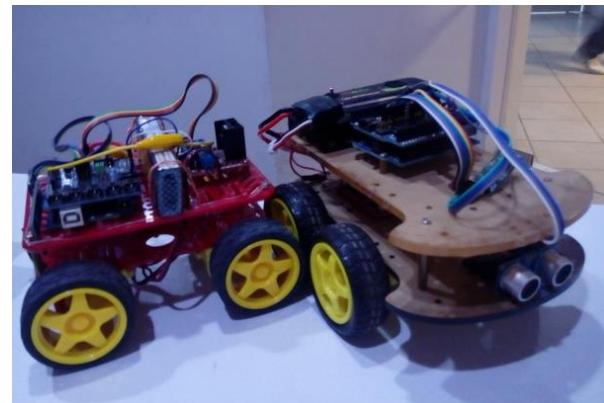


Figura 5 Robots armados en el taller

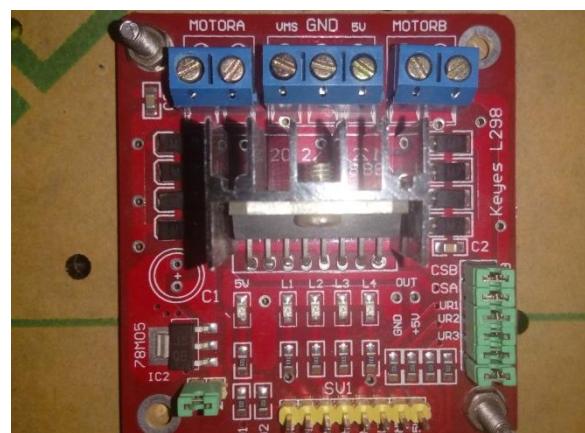


Figura 6 Puente H Keyes L298

Generador de Mapas

Uno de los proyectos que se está llevando a cabo es el de crear mapas de un ambiente desconocido, para lo cual se utiliza un servomotor con un sensor ultrasónico (Ver Figura 7), el cual al girar censa 180° del ambiente, la información recolectada se envía a una computadora la cual se encarga de graficarla para tener una referencia visual del ambiente que se encuentra frente el sensor ultrasónico. Este proyecto tiene como fin ayudar a un robot móvil a desplazarse en ambientes desconocidos evitando chocar con obstáculos y planificar trayectorias.

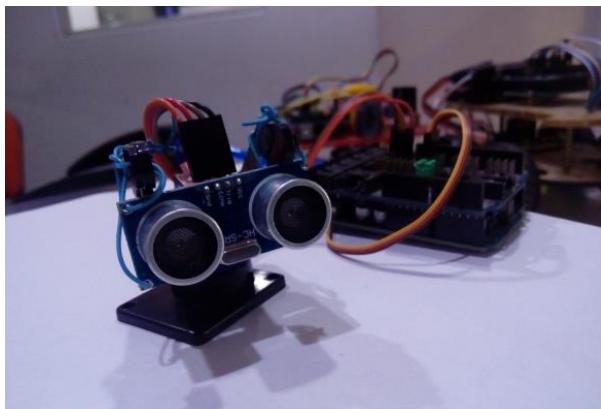


Figura 7 Sensor ultrasónico con servomotor

Framework Robot (Trabajo futuro)

Otro proyecto derivado del taller es la realización de un framework en el cual se tengan las funciones necesarias para controlar un robot, por ejemplo moverlo en varias direcciones, controlarlo por bluetooth e infrarrojo y uso de sensores con el fin de programar nuevos robots móviles más rápido, esto ayudará a ser más productivos en proyectos de robótica futuros.

Conclusiones

La robótica es un área muy atractiva, la cual en estos últimos años ha tenido mucho auge entre los jóvenes estudiantes de nivel medio superior y superior a tal grado que se han obtenido campeonatos a nivel internacional principalmente en el presente año (Notimex, 2015).

Arduino en este orden de ideas es una opción viable para el aprendizaje de robótica a un bajo costo y acceso a documentación gratuita. Permite además una visión tangible de la programación desarrollando la lógica de programación en los alumnos, captando su atención de una forma interesante que otras plataformas no logran.

Actualmente en México hay mucho talento para el área de la robótica, es por ello que debería de recibir más apoyo económico y así mismo aprovecharse el ingenio de los estudiantes para producir nueva tecnología y resolver problemas del país (Gómez Quintero, 2015).

Referencias

Cook, G. (2011). *Mobile Robots: Navigation, Control and Remote Sensing*. United States of America: Wiley-IEEE Press.

de Melo, R. M., de Melo Filho, I. J., de Oliveira Feliciano, F. D., Saraiva Carvalho, R., Almeida Brito, J., & Gomes, A. S. (2014). Using Arduino as Pedagogical Strategy in Learning Logic Programming. *Information Systems and Technologies (CISTI), 2014 9th Iberian Conference on*, 18-21.

Gómez Quintero, N. (09 de Mayo de 2015). *Campeones: amos de la robótica sin apoyo*. Recuperado el 02 de Julio de 2015, de <http://archivo.eluniversal.com.mx/nacion-mexico/2015/impreso/campeones-amos-de-la-robotica-sin-apoyo-225798.html>

Herger, L. M., & Bodarky, M. (2015). Engaging Students with Open Source Technologies and Arduino. *IEEE Integrated STEM Education Conference*, 27-32.

Notimex. (22 de Junio de 2015). *Alumnos de IPN ganan 7 medallas en competencia de robótica en Brasil*. Recuperado el 02 de Julio de 2015, de <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2015/06/22/alumnos-de-ipn-ganan-7-medallas-en-competencia-de-robotica-en-brasil-885.html>

Valencia Juliao, H. (21 de Abril de 2015). *Buscan convertir a México en potencia de minirobótica.* Recuperado el 02 de Julio de 2015, de <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/robotica/1284-objetivo-convertir-a-mexico-en-potencia-mundial-de-mini-robotica>

Sistema de adquisición de datos de bajo costo con la plataforma arduino*

Low cost data acquisition system with the arduino platform

Martín Azúa-Barrón^{1§}, Mario Alberto Vázquez-Peña¹, Ramón Arteaga-Ramírez¹ y Raúl Hernández-Saucedo¹

¹Ingeniería Agrícola, Uso integral del Agua y Departamento de irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México, México. CP. 56227. §Autor para correspondencia: potosino92@hotmail.com.

Resumen

Aun cuando los avances en electrónica son inmensos y el mercado está saturado de instrumentos y sensores que permiten tomar y almacenar datos estos no suelen ser nada económicos y sigue existiendo la necesidad de disponer de aparatos que recopilen y almacenen información a bajo costo, que puedan ser accesibles a productores, investigadores o estudiantes con bajo presupuesto lo cual suele ser muy común en nuestro país; de allí que surja la necesidad de contar o tener la manera de construir un sistema de adquisición de datos (SAD) en este trabajo se menciona las partes necesarias así como los elementos que se requieren para construir un SAD económico y confiable basado en la plataforma Arduino.

Palabras clave: humedad relativa, memorias de almacenamiento, sensores y multiplexor, temperatura.

Introducción

Los seres humanos obtienen información del ambiente que los rodea a través de sus sentidos, los sistemas electrónicos adquieren información utilizando sensores, hoy en día están

Abstract

Although the advances in electronics are immense and the market is saturated with instruments and sensors that allow to take and store data these are usually not economic and there is still a need to have devices that collect and store information at low cost, which may be accessible to producers, researchers or students with low budget which is very common in our country; hence the need to tell or have a way to build a data acquisition system (SAD) in this paper mentions the necessary parts as well as the elements that are required to build an economic and reliable SAD based on the Arduino platform.

Keywords: relative humidity, sensors and multiplexer, storage memories, temperature.

Introduction

Humans get information from the environment that surrounds them through their senses, electronic systems acquire information using sensors, today they are present in all human activities, in systems for the industrial

* Recibido: diciembre de 2016
Aceptado: febrero de 2017

presentes en todas las actividades del quehacer humano, en los sistemas para el control industrial de procesos, automóviles, aviones, aparatos médicos, aparatos electrodomésticos, etc. y se han hecho una parte esencial para el bienestar de nuestras vidas (Reverter y Areny, 2005), en el caso de la agricultura la situación no es diferente y llegaron para quedarse; Abdullah y Barnawi (2012) mencionan que las redes de sensores están entre las 10 tecnologías emergentes que cambiarán el mundo para bien. El desarrollo por parte de la industria electrónica de los micro controladores, de una gama amplia de dispositivos útiles para censar las variables de interés, dispositivos externos de almacenamiento de datos SD (security digital), pantallas de cristal líquido y los multiplexores que permiten utilizar una misma entrada analógica del micro controlador para censar a la vez varias variables analógicas, de forma natural crea la necesidad de contar con un sistema de adquisición de datos sin tener que utilizar una notebook o computadora personal y surgen los dispositivos que adquieren y almacenan datos de señales analógicas comúnmente denominados registradores de datos (dataloggers) (Saha *et al.*, 2006; Vázquez *et al.*, 2014).

Aunque hoy en día la tendencia es hacia la utilización de sensores y aparatos inalámbricos (Postolache *et al.*, 2012). Sin duda ofrecen algunas ventajas en ciertas condiciones, siempre habrá situaciones donde sea más conveniente utilizar sensores tradicionales y de bajo costo. Sobre todo cuando se quiera censar superficies o ambientes pequeños como son invernaderos o parcelas pequeñas que con un poco de planeación el cableado no tenga que ser una situación complicada, además de no tener pérdidas significativas de voltaje. La adquisición de datos es definida como el proceso de tomar información de la realidad mediante una señal como entrada, puede ser corriente o voltaje, para su posterior procesamiento y análisis, almacenamiento u otro tipo de manipulación (Chase *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2012; Singh and Sharma, 2012).

Junior (2012), realizó una evaluación en la que compara el micro controlador de arduino en la medición de señales analógicas comparándolo con las salidas que arroja un ohmímetro (voltímetro) analógico concluye que se puede confiar en éste para la realización de mediciones analógicas en el suelo en lo que respecta a conductividad eléctrica. La comunidad científica ha mostrado interés en generar sistemas de adquisición de datos que sean económicos, fácil de construir, confiables, como los construidos por Fisher y Kebede (2010); Rahmat *et al.* (2012) que se implementaron cumpliendo con los criterios anteriores.

control of processes, automobiles, airplanes, medical devices, household appliances, etc. and have become an essential part of the welfare of our lives (Reverter and Areny, 2005), in the case of agriculture the situation is not different and they arrived to stay; Abdullah and Barnawi (2012) mention that sensor networks are among the 10 emerging technologies that will change the world for good. The development by the electronics industry of microcontrollers, a wide range of devices useful for census of the variables of interest, external data storage devices SD (security digital), liquid crystal displays and multiplexers that allow to use a same analog input of the micro controller to simultaneously census several analog variables, naturally creates the need to have a data acquisition system without having to use a notebook or personal computer and the devices that store and store the data of analog signals commonly called data recorders (dataloggers) (Saha *et al.*, 2006; Vázquez *et al.*, 2014).

Although today the trend is towards the use of wireless sensors and devices (Postolache *et al.*, 2012). They certainly offer some advantages in certain conditions, there will always be situations where it is more convenient to use traditional and low cost sensors. Especially when you want to census surfaces or small environments such as greenhouses or small plots that with a little planning the wiring does not have to be a complicated situation, in addition to not having significant losses of voltage. The acquisition of data is defined as the process of taking reality information through a signal as input, can be current or voltage, for further processing and analysis, storage or other manipulation (Chase *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2012; Singh and Sharma, 2012).

Junior (2012) carried out an evaluation in which he compares the arduino micro controller in the measurement of analogue signals comparing it to the outputs of an analog ohmmeter (voltmeter) it concludes that it can be relied upon to carry out analogue measurements in the ground in terms of electrical conductivity. The scientific community has shown interest in generating data acquisition systems that are economical, easy to build, reliable, such as those constructed by Fisher and Kebede (2010); Rahmat *et al.* (2012) that were implemented in compliance with the above criteria.

The applications of the sensors are diverse such as the automation of drip irrigation based on soil moisture sensors (Ventura *et al.*, 2010; Dursun y Ozden, 2011), to monitor

Las aplicaciones de los sensores son diversas como la automatización del riego por goteo basado en sensores de humedad del suelo (Ventura *et al.*, 2010; Dursun y Ozden, 2011), realizar monitoreo a invernaderos en tiempo real para controlar la luminosidad, el calor, ventilación, riego, etcétera (Kasaei *et al.*, 2011), medición de la radiación solar (Righini *et al.*, 2010), etc. Di Justo y Gertz (2013) muestran la manera de construir diferentes aparatos electrónicos para medir variables atmosféricas utilizando la plataforma arduino UNO.

La medición de la temperatura y la humedad relativa (HR) del aire son componentes esenciales de muchos programas meteorológicos (Whiteman *et al.*, 2000; Zagade y Kawitkar, 2012; Borate y Patil, 2013). Por esta razón en este trabajo se propone realizar un sistema de adquisición de datos de bajo costo con la plataforma arduino, de fácil implementación y que puede ser utilizado para medir temperatura y HR.

Materiales y métodos

El dispositivo desarrollado se basa en la plataforma arduino UNO y los sensores utilizados que son de temperatura y humedad relativa se incluyen en el dispositivo comercial HMZ-433 A1; asimismo, se incorpora un módulo lector de tarjetas SD arduino y una memoria SD de 8 GB de memoria donde se graban los datos. Además se utilizó un par de placas fenólicas y cables para teléfono de 4 hilos, así como los componentes necesarios de la fuente de poder que alimenta al sistema.

Características de la placa arduino UNO. La placa arduino UNO es un dispositivo que se puede comprar ya construido, hay fábricas (SmartProjects en Italia) que los producen con una calidad estandarizada eliminando así las fuentes de error y están disponibles en las tiendas Steren y AGelectrónica entre otras. También se puede construir por quien esté interesado en ello (Tzaputzas, 2014). Los elementos básicos que constituyen la placa arduino UNO, así como sus características principales, si se compra de fábrica son: un micro controlador atmega 328, trabaja con un voltaje de operación de 5 volts, un regulador de voltaje integrado por lo que se puede alimentar externamente con una fuente de poder que opere en un rango de 6 a 20 volts aunque se recomienda no salir de los límites de 7 a 12 volts y un consumo de corriente de 40 mA; tiene seis entradas

greenhouses in real time to control the luminosity, heat, ventilation, irrigation, and so on (Kasaei *et al.*, 2011), solar radiation measurement (Righini *et al.*, 2010), etc. Di Justo and Gertz(2013) show how to construct different electronic devices to measure atmospheric variables using the UNO arduino platform.

The measurement of temperature and relative humidity (HR) of air are essential components of many weather programs (Whiteman *et al.*, 2000; Zagade and Kawitkar, 2012; Borate and Patil, 2013). For this reason, this paper proposes a low cost data acquisition system with the arduino platform, which is easy to implement and can be used to measure temperature and HR.

Materials and methods

The device developed is based on the arduino UNO platform and the sensors used that are of temperature and relative humidity are included in the commercial device HMZ-433 A1; also, an SD card reader Arduino module and an SD memory of 8 GB of memory where the data is recorded. In addition, a pair of phenolic plates and 4-wire telephone cables were used, as well as the necessary components of the power source that powers the system.

Characteristics of the arduino UNO board. The arduino UNO board is a device that can be bought already built, there are factories (SmartProjects in Italy) that produce them with a standardized quality thus eliminating the sources of error and are available in the stores Steren and AGelectrónica among others. It can also be built by anyone interested in it (Tzaputzas, 2014). The basic elements that make up the arduino UNO board, as well as its main features, if purchased from the factory are: an atmega 328 micro controller, it works with a voltage of operation of 5 volts, a voltage regulator integrated by what can be fed externally with a power source operating in a range of 6 to 20 volts although it is recommended not to leave the limits of 7 to 12 volts and a current consumption of 40 mA; has six analog and 14 digital inputs, 32 KB memory capacity to host the program that will be executed once recorded, 0.5 are used by the program called bootloader and it works with a clock frequency of 16MHZ, an EEPROM memory of 1 KB among other characteristics.

analógicas y 14 digitales, capacidad de memoria de 32 KB para alojar el programa que se ejecutará una vez grabado, 0.5 son usados por el programa llamado bootloader y funciona con una frecuencia de reloj de 16 MHZ, una memoria EEPROM de 1 KB entre otras características.

El arduino es en realidad tres cosas: una placa (hardware libre), un software y un lenguaje de programación libre que nació el año de 2005 en el instituto de diseño interactivo Ivrea (Italia), el autor recomienda se especifique el tipo de arduino al que se está haciendo referencia puesto que hay diferentes placas arduino oficiales, cada una de ellas con características y prestaciones particulares (Torrente, 2013). En este documento cuando se hable de Arduino se trata del arduino UNO mismo que se muestra en la Figura 1.

El multiplexor analógico se alimenta con 5 voltios y es el dispositivo electrónico que permite seleccionar varias entradas analógicas a un solo canal con pines de selección teniendo baja impedancia y bajo consumo y una dirección interna de decodificación, en adición la resistencia cuando está en funcionamiento es relativamente constante sobre todo el rango de entrada, el multiplexor usado es el CD4067B con 16 canales que son seleccionados usando cuatro entradas digitales de control cuya combinación de entradas será de acuerdo a la tabla que se muestra en la Figura 2 y será la que defina el canal a utilizar. En la misma figura se muestra el diagrama de conexión del multiplexor, si se requiere información adicional se puede consultar la hoja de datos del fabricante.

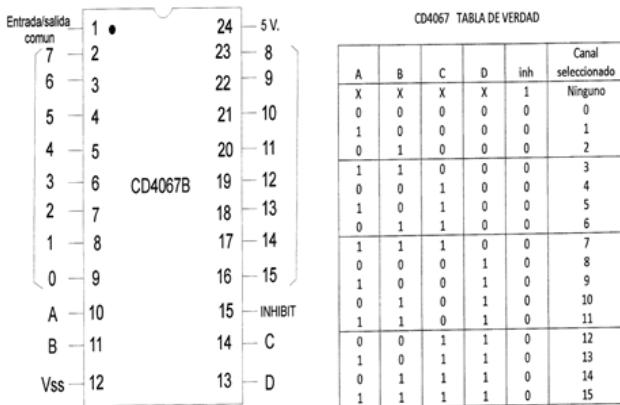


Figura 2. Datos del multiplexor CD4067.
Figure 2. Data of the CD4067 multiplexer.

Con un dispositivo de esta clase se pueden manejar 16 entradas analógicas diferentes y conducir las salidas a una sola entrada analógica del micro controlador, que es una

The arduino is actually three things: a board (free hardware), a software and a free programming language that was born in 2005 at the Interactive Design Institute Ivrea (Italy), the author recommends specifying the type of Arduino at which is being referenced since there are different official arduino boards, each of them with particular characteristics and performance (Torrente, 2013). In this document when speaking of arduino it is the same Arduino ONE that is shown in Figure 1.



Figura 1. Aspecto físico del Arduino UNO.
Figure 1. Physical appearance of the Arduino UNO.

The analog multiplexer is powered by 5 volts and is the electronic device that allows to select several analog inputs to a single channel with selection pins having low impedance and low consumption and an internal direction of decoding, in addition the resistance when in operation is relatively constant over the entire input range, the multiplexer used is the CD4067B with 16 channels that are selected using four digital control inputs whose combination of inputs will be according to the table shown in Figure 2 and will be the one that defines the channel to use. The connection diagram of the multiplexer is shown in the same figure. If additional information is required, the manufacturer's data sheet can be consulted.

With a device of this kind can handle 16 different analog inputs and outputs to a single analog input of the micro controller, which is one of the fundamental parts of this work. To indicate the channel to be read it is necessary to use 4 digital pins of the microcontroller whose outputs will connect to the inputs A, B, C, D of the multiplexer. This same digital signal can be used to add a second and a third multiplexer whose common outputs are connected to different analog inputs of the microcontroller.

SD arduino Reader Module. This device is available in the market at a cost of approximately \$50.00 and the main function is to interface between the Arduino board and

de las partes fundamentales de este trabajo. Para indicar el canal que se va a leer es necesario utilizar 4 pines digitales del micro controlador cuyas salidas conectarán a las entradas A, B, C, D del multiplexor. Esta misma señal digital puede usarse para agregar un segundo y un tercer multiplexor cuyas salidas comunes se conecten a entradas analógicas diferentes del micro controlador.

Módulo Lector SD arduino. Este dispositivo se encuentra a la venta en el mercado a un costo aproximado de \$50.00 y la función principal es servir de interface entre la placa Arduino y la memoria SD, se muestra en la Figura 3a, el diagrama de conexión entre el Modulo Lector SD y la placa Arduino se aprecia en Figura 3b.

Este módulo lector SD puede alojar una memoria SD con capacidad de 2, 4, 8, 16 ó 32 GB, es una cantidad de memoria adecuada para la mayoría de los proyectos, puesto que el formato de grabado es en texto, posteriormente se pasa a formato numérico con una hoja de cálculo ya sea comercial (Excel) o de dominio público como lo es open office.

El consumo de memoria es bajo, como ejemplo se tiene que 1 000 datos en formato texto de cuatro cifras significativas consume alrededor de 6 KB de memoria, si se considera que se van a censar 16 datos por segundo al usar una memoria de 8 GB puede almacenar datos durante 1 000 días, que lo hace muy eficiente e indica que 8 GB es una buena cantidad de memoria. Esta memoria tiene un formato no volátil muy utilizado en dispositivos portátiles (Figura 4).

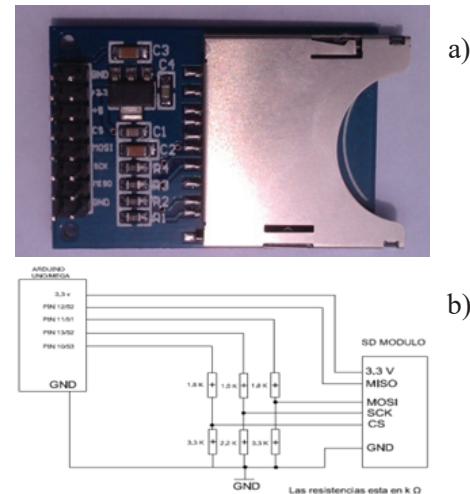


**Figura 4. Memoria seguridad digital (SD).
Figure 4. Digital security memory (SD).**

El dispositivo HMZ-433A1, contiene los sensores de temperatura y humedad relativa (Figura 5a) y la manera como se conecta al arduino UNO (Figura 5b).

En la Figura 6 se observa la respuesta del sensor a la temperatura, que es proporcionada por el fabricante, y se aprecia que no es lineal por lo que es necesario contar con un modelo de ajuste y para ello se resuelve un sistema de una

SD memory, shown in Figure 3a, the connection diagram between the SD Reader Module and The arduino plate is shown in Figure 3b.

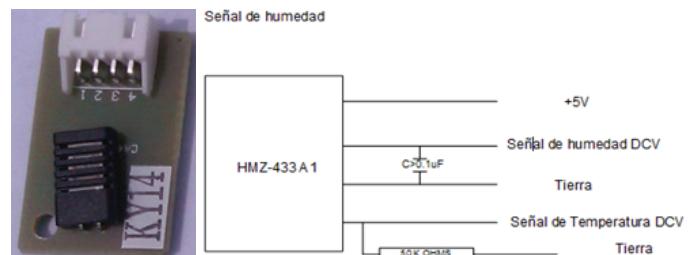


**Figura 3. Modulo lector SD (a) y diagrama de conexión (b).
Figure 3. SD reader module (a) and connection diagram (b).**

This SD reader module can accommodate an SD memory with 2, 4, 8, 16 or 32 GB capacity, it is a suitable amount of memory for most projects, since the recording format is in text, later it is passed to Numerical format with a spreadsheet either commercial (Excel) or public domain as is open office.

Memory consumption is low, as an example you have that 1 000 data in text format of four significant figures consumes about 6 KB of memory, considering that you are going to census 16 data per second when using a memory of 8 GB can store data for 1000 days, which makes it very efficient and indicates that 8 GB is a good amount of memory. This memory has a non-volatile format widely used in portable devices (Figure 4).

The HMZ-433A1 device contains the temperature and relative humidity sensors (Figure 5a) and the way it is connected to the arduino UNO (Figure 5b).



**Figura 5. HMZ-433A1 (a) y diagrama de conexión (b).
Figure 5. HMZ-433A1 (a) and connection diagram (b).**

ecuación con tres incógnitas para encontrar los coeficientes, mismos que serán utilizados en el código de programación (Trastejant, en línea).

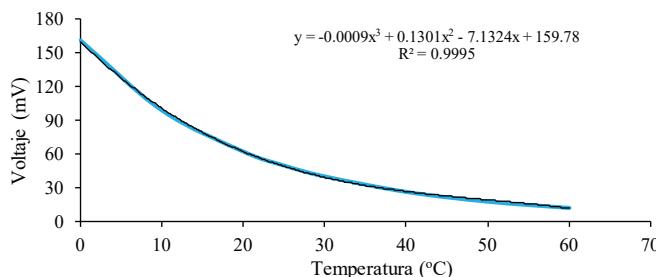


Figura 6. Respuesta del sensor a la temperatura.

Figure 6. Sensor response to temperature.

La fuente de poder necesaria para la alimentación de este dispositivo puede comprarse o construirse y debe suministrar un voltaje de 9 voltios e intensidad de corriente de 1 ampere, la construcción de las fuentes de poder y el montaje de los circuitos no debe suponer ninguna dificultad si se tiene en cuenta la regla básica de que los conductores deben ser lo más corto posible (Kilgenstein, 1996). Asimismo, se utilizan los materiales básicos de un laboratorio de electrónica entre los que se encuentran los multímetros, estación de soldar, pinzas, y desarmadores, entre otros materiales. En la Figura 7 se observa la respuesta del sensor a la humedad relativa, que es proporcionada por el fabricante y es lineal.

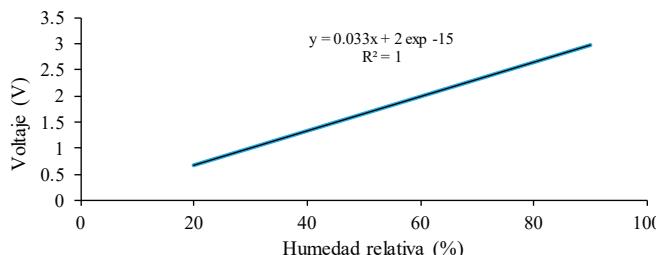


Figura 7. Respuesta del sensor a la humedad relativa.

Figure 7. Sensor response to relative humidity.

Se construyó primero en una tablilla de prototipos (protoboard) de acuerdo al diagrama que se presenta en la Figura 8. En el esquema se muestra el diagrama de un solo HMZ-433 A1 que contiene los sensores de temperatura y humedad relativa conectado a los canales 0 y 1 del multiplexor CD4067, de esa misma manera se pueden conectar los sensores restantes hasta agotar los 16 canales disponibles del multiplexor.

In the Figure 6 shows the response of the sensor to the temperature, which is provided by the manufacturer, and it is noted that it is not linear so it is necessary to have an adjustment model and for this a system of an equation is solved with three unknowns to find the coefficients, which will be used in the programming code (Trastejant, online).

The power source required for the power supply of this device can be purchased or constructed and must supply a voltage of 9 volts and current of 1 ampere, the construction of the power sources and the assembly of the circuits should not be difficult if the basic rule is that drivers should be as short as possible (Kilgenstein, 1996). Also, the basic materials of an electronic laboratory are used, among which are the multimeters, soldering station, clamps, and screwdrivers, among other materials. In the Figure 7 shows the sensor response to relative humidity, which is provided by the manufacturer and is linear.

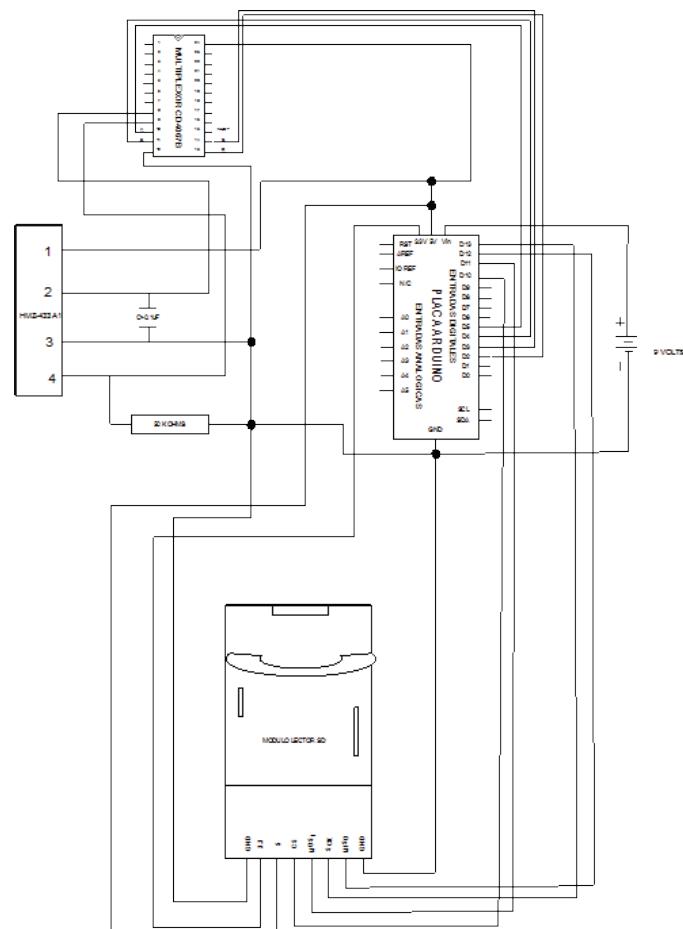


Figura 8. Diagrama de conexión de los componentes del SAD.

Figure 8. Connection diagram of SAD components.

Desarrollo del programa

Para realizar la programación del arduino, es necesario usar una computadora, no requiere de altas prestaciones y el software o programas de cómputo necesarios se encuentran disponibles en la red de manera gratuita (<https://www.arduino.cc/en/main/software>) (Figura 9).



Figura 9. Ambiente de desarrollo de arduino.

Figure 9. Arduino development environment.

El lenguaje de programación arduino se basa en C/C++ como se indica en la sitio oficial y se cuenta con una gran cantidad de librerías que son de libre acceso y facilitan mucho la tarea de programación. Se programó el dispositivo para censar las variables cada hora y mantener los sensores sin energía cuando no se realiza la medición, y mediante una instrucción se energizan medio minuto antes de iniciar la toma de lecturas y se apagan inmediatamente después, la placa arduino UNO se mantiene energizada todo el tiempo, se le adapto una batería recargable de 12 volts para que en caso de fallar el suministro de energía eléctrica de la red no deje de censar y no exista perdida de información.

Es necesario destinar cuatro salidas digitales del arduino UNO para poder indicar al multiplexor cual canal de entrada de los 16 disponibles va a direccionar al canal de salida que será introducido a la entrada analógica de la placa arduino UNO. Otras cuatro salidas digitales se utilizan para el protocolo de conexión y almacenamiento de datos en la memoria SD. El archivo que se crea en caso de no existir

It was first constructed on a protoboard tablet according to the diagram shown in Figure 8. The diagram shows the diagram of a single HMZ-433 A1 containing the temperature and relative humidity sensors connected to the channels 0 and 1 of the CD4067 multiplexer, in the same way the remaining sensors can be connected until the 16 available channels of the multiplexer are exhausted.

Development of the program

For programming the arduino, it is necessary to use a computer, it does not require high performance and the necessary software or computer programs are available on the network for free (<https://www.arduino.cc/en/main/software>) (Figure 9).

The arduino programming language is based on C/C++ as indicated in the official site and has a large number of libraries that are freely accessible and make the programming task a lot easier. The device was programmed to count the variables every hour and to keep the sensors without power when the measurement is not carried out, and by means of an instruction they are energized half a minute before beginning the taking of readings and they turn off immediately after, the plate arduino UNO is maintained Energized all the time, it is adapted a rechargeable battery of 12 volts so that in case of failure the electric power supply of the network do not stop census and there is no loss of information.

It is necessary to assign four digital outputs of the arduino UNO to be able to indicate to the multiplexer which input channel of the 16 available will be directed to the output channel that will be introduced to the analog input of the arduino UNO board. Four other digital outputs are used for the data connection and storage protocol in SD memory. The file that is created in case it does not exist is named datalog.txt and where the data that is previously converted to a string of characters is recorded by the program recorded in the arduino.

Results and discussion

It was verified that the prototype even in protoboard worked adequately in a period of 24 h, was placed inside a meteorological stand with the 14 sensors two

es nombrado `datalog.txt` y donde se graban los datos que previamente se convierten a una cadena de caracteres por el programa grabado en el arduino.

Resultados y discusión

Se verificó que el prototipo aun en protoboard funcionara adecuadamente en un periodo de 24 h, se colocó en el interior de una caja meteorológica con los 14 sensores dos por cada HMZ-433 A1 (Figura 10) y posteriormente se descargaron los datos de la memoria a un computador.

Después de abrir el archivo `datalog.txt` con los datos de temperatura y Humedad relativa registrados y poniendo el encabezado en la hoja de cálculo, quedan de la manera que se indica en la Figura 11. La información presentada se registró en la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo el día 24 de febrero de 2014.

En la Figura 11a se presenta los datos de temperatura y humedad relativa obtenidos: con los sensores HMZ-433A1, en una estación automática y en una estación convencional.

En la Figura 11 se aprecia el comportamiento de los diferentes sensores que en general es uniforme, son datos de la estación automática y reportados por el personal de la estación meteorológica, que presentan mayor variación, lo cual puede deberse a factores diversos como falta de mantenimiento del instrumental, error humano al realizar las observaciones o la falta de calibración de los sensores utilizados lo cual está fuera del alcance de este trabajo (Figura 11 b).

El objetivo de esta prueba es mostrar la efectividad del SAD como herramienta para censar temperatura y humedad relativa y en forma general ver su capacidad para leer y almacenar datos, además de permitir una forma muy simple de transferir la información a la computadora personal.

El sistema de adquisición de datos construido puede ser reprogramado para censar las variables de interés a la frecuencia que se requiera y los datos se almacenan en una memoria SD de 8 GB la cual puede ser remplazada por una memoria de capacidad mayor, la lista de materiales y los costos se presentan en el Cuadro 1.

for each HMZ-433 A1 (Figure 10) and later the data was downloaded from the memory To a computer. After opening the `datalog.txt` file with the temperature and relative humidity data recorded and putting the header in the spreadsheet, they remain as shown in Figure 11. The information presented was recorded in the weather station of the Autonomous University Chapingo on February 24, 2014.



Figura 10. Aspecto de los sensores HMZ-433 A1 dentro de la garita meteorológica.

Figure 10. Aspect of the HMZ-433 A1 sensors inside the weather gauge.

In the Figure 11a shows the temperature and relative humidity data obtained: with the HMZ-433A1 sensors, in an automatic station and in a conventional.

Meteorological station, the behavior of the different sensors, which is generally uniform , are the data of the automatic station and those reported by the personnel of the meteorological station, those that present greater variation, which can be due to diverse factors like lack of maintenance of the instrument, human error in making the observations or the lack of calibration of the sensors used which is beyond the scope of this work (Figure 11 b).

The objective of this test is to show the effectiveness of the SAD as a tool to censor temperature and relative humidity and in general to see its capacity to read and store data, as well as allowing a very simple way to transfer the information to the personal computer.

The built-in data acquisition system can be reprogrammed to census the variables of interest at the required frequency and the data is stored in an 8 GB of SD memory which can be replaced by a larger capacity memory, and the costs are presented in Table 1.

Horas	Temp1 (°C)	HR1 (%)	Temp2 (°C)	HR2 (%)	Temp3 (°C)	HR3 (%)	Temp4 (°C)	HR4 (%)	Temp5 (°C)	HR5 (%)	Temp6 (°C)	HR6 (%)	Temp7 (°C)	HR7 (%)	Datos estación	Datos automática	
																Temp est	Temp auto
9	15.59	52.85	15.92	52.35	16.11	51.73	16.11	51.68	16.35	52.5	16.2	49.3	15.84	53.19	13.9	7.8	
10	19.18	43.49	19.62	42.52	19.1	42.16	19.79	42.68	19.97	42.61	19.71	39.91	19.36	43.49	17.7	50	12.7
11	22.44	34.32	22.71	33.75	22.88	33.4	22.97	33.99	22.97	34.5	22.88	31.67	22.53	34.6	21.3	36	16.1
12	23.53	27.62	23.77	27.7	23.95	26.75	24.4	27.42	24.13	27.11	24.4	25.11	23.77	27.78	22.9	30	18.9
13	25.21	26.17	25.44	25.65	25.66	25.36	26.7	25.75	26.9	25.75	23.92	25.39	26.65	24	29	21.2	30
14	26.62	22.9	26.89	22.25	27.12	22.22	27.3	23.17	27.12	23.8	26.95	21.39	26.66	23.83	25.1	27	22.4
15	26.21	22.1	26.66	21.23	26.75	21.22	26.61	22.3	26.88	21.72	26.84	20.6	26.39	22.31	26.1	24	23.6
16	27.12	20.84	27.3	20.43	27.55	20.24	27.49	21.1	27.58	20.76	27.58	19.15	27.21	21.22	26.2	24	24.4
17	26.11	23.79	26.48	22.78	26.66	22.79	26.39	23.81	26.57	23.62	26.48	21.56	26.11	24.16	25.9	23	24.8
18	23.33	29.64	23.66	28.48	23.86	28.46	23.51	29.74	23.77	29.48	23.68	23.24	29.96	22.8	28	24.8	27
19	21.64	31.52	21.91	30.56	22.9	30.33	21.73	31.63	21.1	31.42	21.91	28.75	21.54	31.95	20.9	30	22.8
20	20.76	32.91	21.3	31.95	21.2	31.74	20.85	32.96	21.11	32.83	21.3	30.13	20.67	33.34	19.9	31	20.9
21	19.88	35.3	20.23	34.11	20.37	33.87	19.97	35.3	20.32	35.1	20.15	32.21	19.71	35.56	19.1	34	19.8
22	19.49	40.51	19.71	39.43	19.97	39.11	19.62	40.36	19.89	40.26	19.79	37.15	19.44	40.89	17.7	35	19.3
23	18.49	46.6	18.92	45.6	19.8	44.91	18.65	45.85	19.9	45.7	19	42.55	18.48	46.76	16.5	45	18.6
24	17.25	57.82	17.69	56.48	17.9	55.47	17.6	56.2	17.96	56.3	17.87	53.22	17.34	57.99	15	60	17.7
1	16.45	63.9	16.81	62.6	17.8	61.14	16.9	62.6	17.3	62.5	16.91	59.98	16.52	64.17	14.1	73	16.4
2	15.15	65.73	15.5	64.5	15.76	63.51	15.59	63.95	15.76	64.31	15.62	61.8	15.15	65.78	13.5	73	15.2
3	13.38	74.21	14	71.8	14.18	69.85	13.93	70.64	14.2	71.4	13.84	69.7	13.41	73.56	11.7	82	14.9
4	11.96	72.62	12.51	70.41	12.86	68.7	12.79	69.37	12.65	70.9	12.63	67.8	12.16	71.1	9.8	89	13
5	10.37	77.82	10.99	75.2	11.27	72.84	11.6	73.35	11.5	74.66	10.98	72.1	10.53	76.88	8	92	11.1
6	9.36	79.83	9.72	78.52	9.9	77.23	9.45	78.84	9.81	78.5	9.66	76.37	9.27	80.44	7.7	96	9.9
7	8.99	79.69	9.36	77.9	9.62	76.56	9.31	78.4	9.47	77.87	9.45	75.5	8.99	79.52	8	96	9
8	11.34	70.66	11.96	68.23	12.44	66.41	12.51	66.18	12.31	67.94	12.24	64.56	11.95	68.88	8.9	96	8.2
9	15.84	61.59	16.19	61.23	16.47	60.2	16.55	59.91	16.64	60.47	16.46	57.75	16.2	61.51	14.5	78	8.9

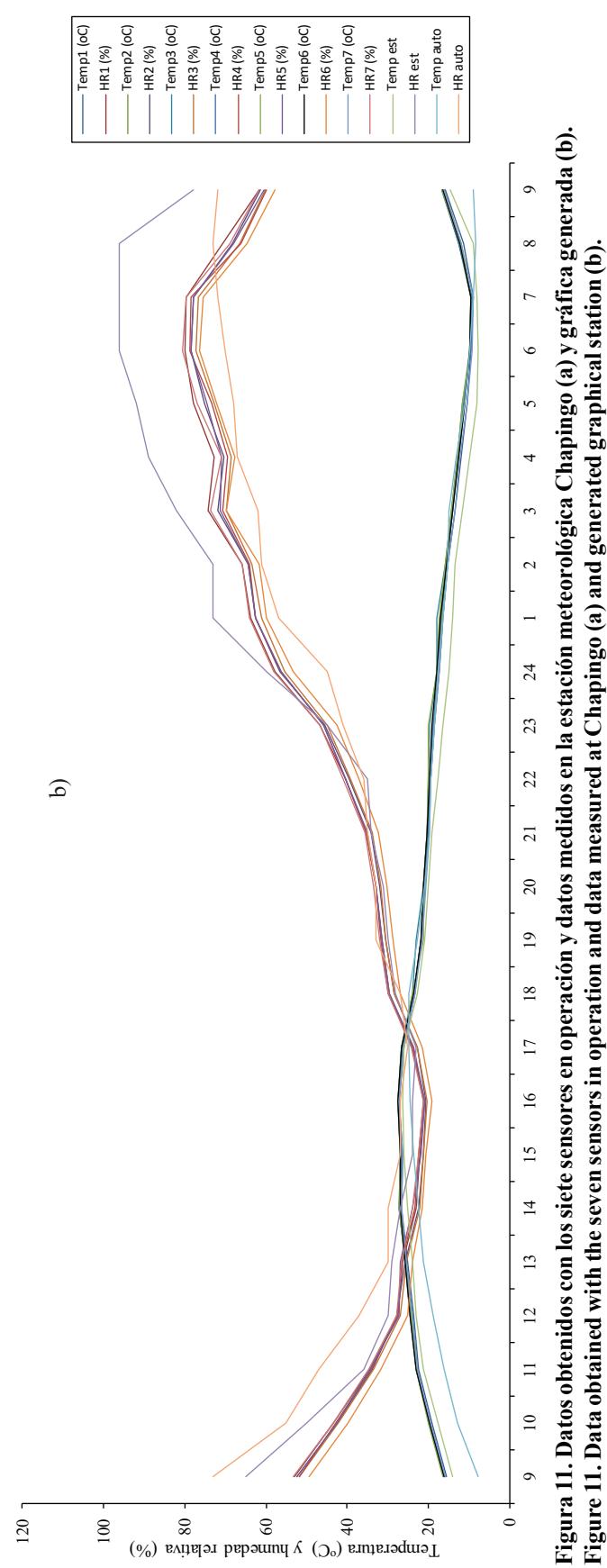
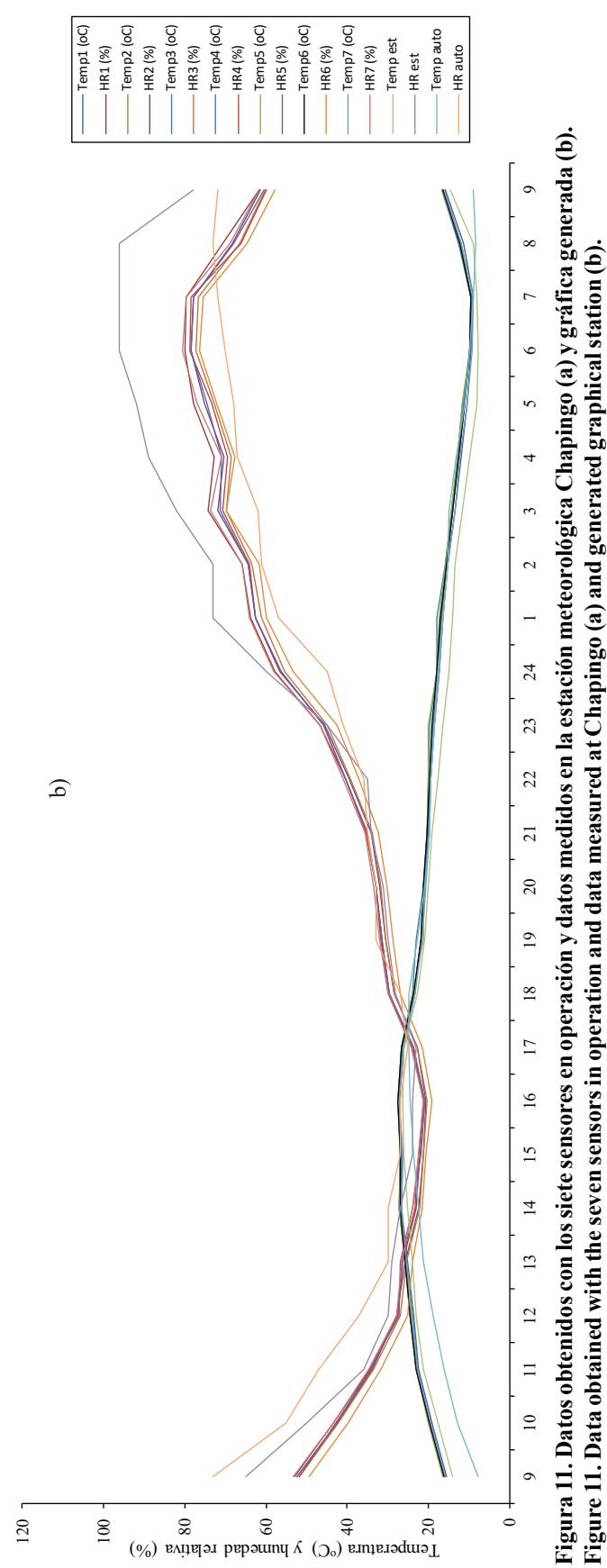


Figura 11. Datos obtenidos con los siete sensores en operación y datos medidas en la estación meteorológica Chapingo (a) y gráfica generada (b).
Figure 11. Data obtained with the seven sensors in operation and data measured at Chapingo (a) and generated graphical station (b).

Cuadro 1. Lista de los principales componentes del SAD desarrollado y su costo en dólares.

Table 1. List of main components of the developed SAD and its cost in dollars.

Descripción	Número de parte	Fabricante	Costo (US\$)
Arduino UNO	A000066	SmartProjects	17.00
Multiplexor	CD4067BE	Motorola Cmos L. D	1.52
2 placas fenólicas	MOD 400	Steren	5.76
Modulo lector SD	S/N	Shenzhen LC Tech. Co	3.84
Memoria SD de 8 GB	S/N	Kingston Technology	10.00
Sensores	HMZ-433A1	Ghitron Technology	8.22
Gabinete	GP-11	Steren	5.30
Cable de tel. de 4 vías 5m	MO4T-305	Steren	1.52
6 borneras	TRT-03	Steren	2.27
Partes misceláneas	S/N	Diversos	1.89

En los SAD comerciales en ocasiones la reprogramación de la frecuencia de medición o el mantenimiento suelen ser complicados y requerir de personal especializado. El que se propone en este trabajo consta de menos partes, es de muy fácil construcción y apoyado en los recursos que gratuitamente comparte la comunidad de Arduino resulta muy fácil su reprogramación (Torrente, 2013). Se logró un balance entre construcción, programación, memoria, funcionalidad y costo, lo que lo hace muy versátil. Fisher y Kebede (2010), proponen un sistema de adquisición de datos de bajo costo para monitorear la temperatura y humedad de los cultivos, se muestra la lista de los componentes y costos requeridos para implementarlo en el Cuadro 2. El costo total de este dispositivo es de 84.1 dólares. Una de las debilidades de este sistema es su capacidad de almacenamiento limitada a la memoria que utiliza.

El costo de las partes esenciales para la construcción del SAD se desglosa en el Cuadro 1 y dan un total de 57.32 dólares, costo menor al presentado en el cuadro 2 que corresponde a la propuesta de Fisher y Kebede (2010), y es más económico

In commercial SADs sometimes reprogramming of measurement frequency or maintenance is often complicated and requires specialized personnel. The one proposed in this work consists of fewer parts, is very easy to build and supported by the resources freely shared by the arduino community, its reprogramming is very easy (Torrente, 2013). It achieved a balance between construction, programming, memory, functionality and cost, which makes it very versatile. Fisher and Kebede (2010) propose a low-cost data acquisition system to monitor crop temperature and humidity, list the components and costs required to implement it in Table 2. The total cost of this device is \$84.10. One of the weaknesses of this system is its storage capacity limited to the memory it uses.

Cuadro 2. Lista de materiales y costos para monitorear temperatura y humedad de los cultivos.

Table 2. List of materials and costs for monitoring crop temperature and humidity.

Descripción	Número de parte	Fabricante	Costo (US\$)
Microcontroller	Pic16f88	Microchip technologies	2.60
Real-time clock	DS1307	Dallas semiconductor	3.00
Memory	24LC1025	Microchip technologies	4.00
Counter	74HC4060	Fairchild semiconductor	0.50
Voltage regulator	LP2950	National semiconductor	0.50
Voltage regulator	UA78M33C	Texas instrument	1.00
Miscellaneous (oscillator, resistor, capacitors, headers, sockets, batteries, cables, etc.)			13.00
Air temperature sensor	LM35	National semiconductor	1.00
Soil temperature sensor	TC74	Microchip technologies	1.50
Infrared temperature sensor	MLX90614	Melexis	27.00
Soil temperature sensor	200-55	Irrometer	30.00

Fuente: Fisher y Kebede (2010).

que cualquiera de los dataloggers comerciales que presentan prestaciones similares o menores. Se presenta una lista de diferentes sistemas de adquisición de datos que se pueden comprar en tiendas en línea como son www.ebay.com y www.mercadolibre.com en donde se pueden adquirir artículos usados y nuevos (Cuadro 3). Se aprecia que los costos son altos si se comparan con el costo total de los componentes del SAD propuesto en el Cuadro 1.

En la Figura 12 se presenta el aspecto físico del SAD construido y se aprecia la sencillez lograda.

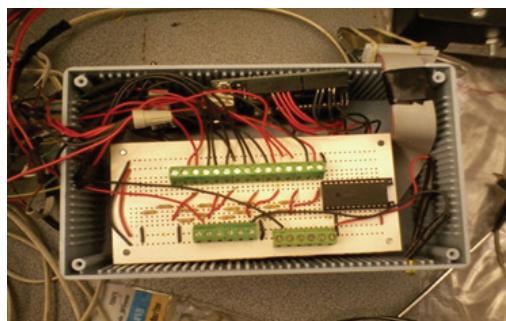


Figura 12. Sistema de adquisición datos.

Figure 12. Data acquisition system.

Conclusiones

Es posible construir un SAD de bajo costo basado en la plataforma Arduino, con conocimientos básicos de programación y electrónica utilizando los diferentes dispositivos que se encuentran en el mercado a precios accesibles. La inclusión del multiplexor analógico le da capacidad al sistema para censar hasta 16 variables analógicas como la temperatura y humedad relativa aunque pueden ser consideradas otras variables al contar con sensores para su medición.

El utilizar la plataforma Arduino lo hace un SAD muy versátil, sencillo y confiable, puesto que se puede reprogramar fácilmente para censar variables de interés diversas y puede ser implementado rápidamente. Se evita la pérdida de datos en las interrupciones del suministro de la red si se adapta una batería recargable de 9 voltios como fuente de alimentación secundaria.

Este dispositivo se puede utilizar con ventajas en trabajos de investigación o en extensiones de cultivo pequeñas donde se tengan la necesidad de monitorear variables de interés,

The cost of the essential parts for the construction of the SAD is broken down in Table 1 and give a total of \$57.32, lower cost than that presented in table 2 that corresponds to the Fisher and Kebede (2010) proposal, and is more economical than any of the commercial dataloggers that present similar or lower performance. A list of different data acquisition systems that can be purchased from online stores such as www.ebay.com and www.mercadolibre.com is available, where used and new items can be purchased (Table 3). It can be seen that costs are high when compared to the total cost of the proposed SAD components in Table 1.

Cuadro 3. Costo de algunos dataloggers que se encuentran disponibles en las tiendas en línea.

Table 3. Cost of some dataloggers that are available in online stores.

Descripción	Link para más información	Costo (US dls)
GPRS/SMS	http://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-de-medida/medidor/modulo-inalambrico-microcom-datalogger-gprs-sms-nemos-lp-det_356543.htm	970.00
NEMOS LP	http://es.omega.com/ppt/pptsc_es.asp?ref=tc-08	372.00
TC módulo de adquisición de datos con termopares	http://articulo.mercadolibre.com.mx/mlm-443972103-termohigrometro-ambiental-con-datalogger-_jm	160.00
CEM DT-172	http://articulo.mercadolibre.com.mx/mlm-443185994-graficador-de-temphr-touchscreen-con-datalogger-_jm	720.00
Dickson	http://articulo.mercadolibre.com.mx/mlm-443185994-graficador-de-temphr-touchscreen-con-datalogger-_jm	299.00
Campbell scientific 21X8 imput cannel	http://www.ebay.com/itm/campbell-scientific-21x-8-input-channel-19-296-data-points-humidity-data-logger-/221387917298?pt=lh_defaultdomain_0&hash=item338bbf87f2	1325.00
DT50 series T	http://www.ebay.com/itm/datataker-dt50-series-3-data-logger-new-/360884514278?pt=lh_defaultdomain_3&hash=item540664ade6	

Fuente: (www.ebay.com y www.mercadolibre.com.mx) al momento de la investigación y que no necesariamente son nuevos.

también se puede usar como alternativa de medición en invernaderos o micro túneles. El sistema fue de bajo costo comparado con otro desarrollado por otro investigador resulto ser más barato. Y con sistemas parecidos que existen en el mercado presenta la misma característica.

Literatura citada

- Abdullah, A. and Barnawi, A. 2012. Identification of the type of agriculture suited for application of wireless sensor networks. *Rus. J. Agric. Socio. Econ. Sci.* 12(2):19-36.
- Borate, U. G. and Patil, R. T. 2013. Wireless real time proportional control system. *Inter. J. of Comm.* 1(2):15-20.
- Chase, A. O.; Sampaio, M. H. K.; Almeida, J. F. and Brito, de S. J. R. 2012. Data acquisition system: an approach to the amazonian environment. *Latin America Transactions, IEEE. Rev. IEEE Ame. Lat.* 10(2):1616-1621.
- Dursun, M. and Ozden, S. 2011. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Sci. Res. Essays.* 6(7):1573-1582.
- Di, J. P. and Gertz, E. 2013. Athmospheric monitoring with arduino. Maker Press. Primera edición. USA. 150 p.
- Fisher, D. K. and Kebede, H. 2010. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. Elsevier B.V. Computers and electronics in agricultura. 74:168-173.
- Junior, M. M.; Nunes, R. O. and Celinski, V. G. 2012. Evaluation of the use of a microcontroller measures the platform Arduino sensor data in electrical conductivity of solo. Brasil. *Rev. Eng. Tecnol.* 4:52-57.
- Kasaei, S. H.; Kasaei, S. M. and Kasaei, S. A. 2011. Design and development a control and monitoring system for greenhouse conditions based-on multi agent system. *Broad Res. Art. Intel. Neur. (BRAIN).* 2(4):28-35.
- Kilgestain, O. 1996. Fuentes de alimentación electrónica. Circuitos prácticos de electrónica. Ediciones CEAC. España. 120 p.
- Postolache, O.; Pereira, J. D. and Girão, P. M. 2012. Greenhouses microclimate real-time monitoring based on a wireless sensor network and gis. Republic of korea. In: XX IMEKO world congress Methodology for Green Growth. 1:1-5.
- Rahmat, M.; Azis, M.; Rustami, E.; Maulina, W.; Seminar, K. B.; Yuwono, A. S. and Alatas, H. 2012. Low cost configuration of data acquisition system for wireless sensor network. *Indonesia. International J. Eng. Technol.* 12(02):23-32.
- Reverter, F. and Pallas, A. R. 2005. Direct sensor-to-microcontroller interface circuit design and characterisation. Spain. 135 p.
- Righini, R.; Roldán, A.; Grossi, G. H.; Aristegui, R. y Raichijk, C. 2010. Nueva red de estaciones de medición de la radiación solar. In: *Comunicaciones del XXXIII Congreso de ASADES.* 11:1-5.
- Saha, S.; Islam, M. T. and Hossain, M. Z. 2006. Design of a low cost multi channel data logger. *ARPN. J. Eng. Appl. Sci.* 1(1):26-32.
- Sharma, K.; Shrimali, H.; Sing, H. J. and Chattri, A. 2012. Data acquisition and supervisory control system for environmental parameters in greenhouses. *Inter. J. Eng. Trends Technol.* 31(5):595-600.
- Singh, N. M. and Sharma, K. C. 2012. Design of PIC12F675 microcontroller based data acquisition system for slowly varying signals. India. *arXiv preprint arXiv:1207.2060.*

In the Figure 12 presents the physical aspect of the built SAD and shows the simplicity achieved.

Conclusions

It is possible to build a low-cost SAD based on the Arduino platform, with basic programming and electronics knowledge using the different devices that are available in the market at affordable prices. The inclusion of the analog multiplexer gives the system the ability to census up to 16 analog variables such as temperature and relative humidity although other variables can be considered when counting on sensors for measurement.

Using the Arduino platform makes it a very versatile, simple and reliable SAD, since it can be reprogrammed easily to census variables of diverse interest and can be implemented quickly. Data loss in network power interruptions is avoided by adapting a 9-volt rechargeable battery as a secondary power supply.

This device can be used with advantages in research works or in small crop extensions where the need to monitor variables of interest is also possible as an alternative of measurement in greenhouses or micro tunnels. The system developed was inexpensive because when compared to another developed by another researcher turned out to be cheaper. And with similar systems that exist in the market presents the same characteristic.

End of the English version

-
- Torrente, A. O. 2013. Arduino. *Curso práctico de formación.* Alfaomega. Primera Edición Rustica. Madrid, España. 588 p.
- Vázquez, R.; Robledo, A.; Toledo, P.; Mason, L.; Mariguetti, J. y Canali, L. 2014. Desarrollo de un procedimiento para construir un datalogger de bajo presupuesto utilizando un dispositivo genérico. In: II Jornada de Investigación en Ingeniería del NEA y países limítrofes. Argentina. 543 p.
- Ventura, F.; Facini, O.; Piana, S. and Rossi, P. P. 2010. Soil moisture measurements: comparison of instrumentation performances. *Journal of irrigation and drainage engineering.* E-Asce. 136(2):81-89.
- Whiteman, C. D.; Hubbe, J. M. and Shawe, W. J. 2000. Evaluation of an inexpensive temperature data logger for meteorological applications. *Am. Meteorol. Soc.* 17:77-81.
- Zagade, S. U. and Kawitkar, R. S. 2012. Advanced greenhouse using hybrid wireless technologies. India. *Inter. J. Adv. Res. Computer Sci. Electr. Eng.* 1(4):31-34.

Implementación de un sistema de adquisición de datos para monitorear una máquina de corriente directa

Data acquisition system implementation to monitor a direct current machine

JOHN EDUAR OSORIO

Ingeniero Eléctrico. Auxiliar de investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. josorio@correo.udistrital.edu.co

JUAN DANIEL PÉREZ RAMÍREZ

Ingeniero Eléctrico. Ingeniero de diseño Junior de Siemens. Bogotá, Colombia. judperezr@correo.udistrital.edu.co

MARIO ALBERTO RODRÍGUEZ BARRERA

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Alta Tensión. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. marodriguezb@udistrital.edu.co

Clasificación del artículo: investigación (Conciencias)

Fecha de recepción: febrero 2 de 2010

Fecha de aceptación: agosto 3 de 2010

Palabras clave: Instrumentación virtual, Máquina de corriente directa, Programación gráfica, Sistema de adquisición de datos.

Key words: Virtual instrumentation, Direct current machine, Graphical programming, Data acquisition system.

RESUMEN

Este artículo presenta la implementación de un sistema de adquisición de datos para monitorear las variables mecánicas y eléctricas en una máquina de corriente directa. Mediante transductores adecuados se capturan las señales de tensión, corriente, par y velocidad, con el fin de ser enviadas a un computador personal (PC) para observar su comportamiento y relación entre sí, ante los diversos estados de operación de la máquina. Se brinda una herramienta de labo-

ratorio que permite la visualización y el análisis del comportamiento de las máquinas eléctricas rotativas, promoviendo formas alternativas en los procesos de enseñanza, no solo en esta área sino también en ámbitos como la programación gráfica e instrumentación.

ABSTRACT

On this paper, we present a data acquisition system implemented to monitor the mechanic and electric variables in a direct current machine. Tension,

current, torque, and speed signals are captured by means of suitable transducers to be sent to a personal computer (PC) to observe their behavior and the relation between them, on different working states in the machine. A laboratory tool is given to offer the

view and analysis of the behavior in rotation electric machines, promoting alternative ways in teaching processes in this area as well as in subjects such as graphical programming and instrumentation.

* * *

1. Introducción

En el estudio de las máquinas eléctricas rotativas se busca entender el comportamiento de las variables electromagnéticas y su relación con las variables de tipo mecánico en los diferentes estados de operación de la máquina, que en términos generales definiremos como de estado estacionario y estado transitorio.

Con pruebas convencionales de laboratorio, en algunos casos es posible llegar a determinar de manera parcial y discreta el comportamiento de la máquina eléctrica rotativa. Sin embargo, actualmente existen sistemas que permiten integrar diversos recursos para controlar y monitorear diferentes variables de un proceso, los cuales se conocen genéricamente como sistemas de adquisición de datos (SAD) [1].

Los SAD se componen de diferentes etapas. En la primera se requiere determinar las variables del proceso que contienen la información requerida para el análisis y el tipo de transductores adecuados. La segunda etapa requiere el acondicionamiento de estas variables, con el propósito de convertirlas en señales eléctricas que se adecuen a las especificaciones del SAD. La tercera etapa hace uso de las señales adquiridas, las cuantifica y las convierte en un código digital equivalente para enviarlas a un ordenador mediante un protocolo de comunicación. La cuarta y última etapa consiste en la utilización de un software especializado, con el fin de procesar los datos equivalentes a las variables registradas para su manipulación, de acuerdo con la aplicación específica del SAD [2]. La Figura 1 muestra un esquema general para la implementación del SAD propuesto.

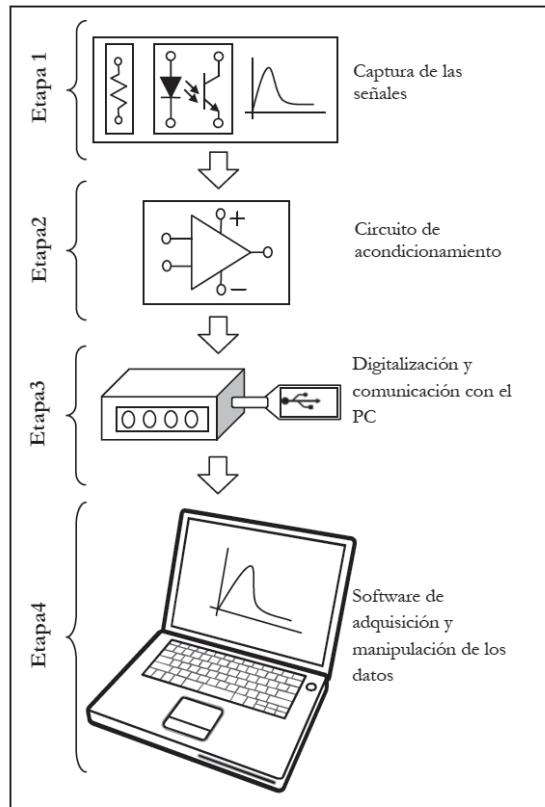


Figura 1. Etapas requeridas para el SAD a implementar.

Debido al elevado costo que implica un SAD, pocas entidades educativas invierten en la adquisición de estos equipos para aplicaciones académicas [3] [4]. Este documento presenta la implementación de un SAD de bajo costo que monitorea las variables eléctricas y mecánicas de una máquina de corriente directa, en sus diferentes formas de conexión y operación, con el fin de promover una forma alternativa

en los procesos de enseñanza en las áreas de máquinas eléctricas rotativas e instrumentación virtual.

2. Metodología y materiales

2.1. Transductores seleccionados y acondicionamiento de las señales

En las máquinas eléctricas rotativas existen muchos parámetros que pueden ser analizados con el fin de entender su comportamiento. Sin embargo, las principales variables que caracterizan su rendimiento son las relacionadas con la potencia de entrada y salida de la máquina [5] [6]. En una máquina de corriente directa las variables relacionadas con la potencia son: tensión, corriente, par y velocidad. Por lo tanto, estas se definen como las variables a monitorear, teniendo en cuenta que la máquina puede conectarse en sus distintas configuraciones sin realizar modificaciones en su parte constructiva, tal como se muestra en la Figura 2.

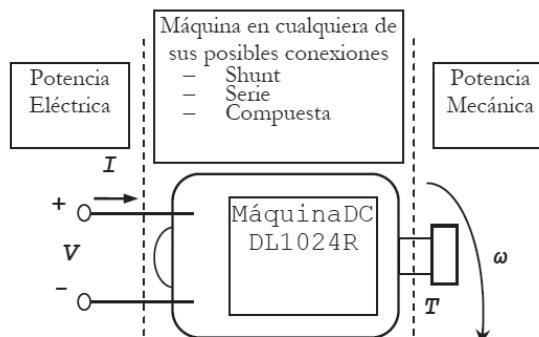


Figura 2. Variables a monitorear en la máquina DC.

En la selección de los transductores a implementar se tienen en cuenta variables asociadas a los rangos de operación de la máquina, linealidad, costo y disponibilidad en los laboratorios del proyecto curricular [7] [8].

La Tabla 1, muestra los sensores finalmente seleccionados junto con sus rangos de medida y relaciones de transformación.

Tabla 1. Selección de transductores.

Variable a capturar	Sensor o transductor seleccionado	Rango de Medida	Relación de transformación
Tensión	Opto-coplador	0 - 500 [V]	100
Corriente	Sensor de efecto Hall	0 - 350 [A]	5mV/A
Par	Galga Extensiométrica	0 - 150 [Nm]	20mV/Nm
Velocidad	Opto-acoplador	0 - 500 [KHz]	5pulsos/giro

Para la digitalización de las señales se establece un rango de variación entre 0 y 5 V, teniendo en cuenta las características del sistema de adquisición. Esto se logra implementando en cada señal dos ajustes por medio de amplificadores operacionales: uno suma o resta un nivel de tensión para fijar la señal en cero y el otro permite variar la ganancia para que la señal de salida tenga un rango de 0 a 5 V. Estos ajustes se hacen por medio de resistencias variables (*trimmer*).

2.2. Digitalización y comunicación al PC

Para la implementación de un SAD se debe contar con hardware que digitalice y cuantifique las señales capturadas. Generalmente se emplean tarjetas de adquisición de datos comerciales que cumplen ampliamente con las necesidades de los SAD para monitoreo y control de procesos [1]. Sin embargo, son equipos costosos, lo cual limita su aplicación en determinados sistemas. Es por este motivo que se plantea la construcción de la tarjeta de adquisición de datos de bajo costo y características constructivas simples.

La evolución y el desarrollo de los microcontroladores les ha permitido a estos brindar características tales como: comunicación con el ordenador, memoria, conversión AD y DA, puertos, relojes, etc. [9]. Algunos fabricantes como Microchip han desarrollado librerías que permiten la comunicación entre los microcontroladores y el PC, específicamente para la familia PIC18FXX5X. Esta comunicación puede ser de tipo USB. Aprovechando estas características, así como el bajo costo y la

facilidad de adquirirlos en el mercado, se emplea un microcontrolador para digitalizar las señales y realizar la comunicación con el PC.

El microcontrolador empleado es un PIC18F2550 de Microchip, el cual permite la comunicación USB con el PC, haciendo uso de las librerías contenidas en el compilador. Esta comunicación puede ser de tres tipos: *Human Interface Device* (HID) la cual presenta una velocidad baja y no requiere *driver*, *Communication Device Class* (CDC) que emula un puerto serie virtual, presenta velocidad media y requiere *driver*, o Custom Driver que presenta alta velocidad y requiere *driver* [10].

Para esta aplicación se decide utilizar la comunicación tipo Custom Driver (*bulk*). Los ejemplos contenidos en el compilador son una herramienta para el desarrollo de esta comunicación.

La conversión análogo-digital del microcontrolador permite la discretización de las variables a monitorear en datos de 8 bits, obteniendo un código digital equivalente con valores entre 0 y 255. Estos son almacenados en paquetes de 64 bytes para ser enviados al PC. La velocidad de muestreo para cada variable es de 2850 Sa/s, la cual se calcula teniendo en cuenta el criterio de Nyquist.

2.3. Software de adquisición y programación

La comunicación vía USB entre el PC y un microcontrolador de la familia PIC18FXX5X se puede configurar utilizando el *drivermchpush.sys* que proporciona Microchip. Este contiene una librería especificada como *mpushapi.dll* en la cual se encuentran las funciones de acceso al puerto USB mediante el microcontrolador. En cuanto al software para la adquisición se decide utilizar la herramienta LabVIEW, la cual cuenta con funciones optimizadas para la adquisición de datos. Además maneja programación mediante un lenguaje gráfico que simplifica la manipulación de los datos y ofrece un entorno de visualización amigable al usuario muy útil para la enseñanza [11].

Para llamar códigos escritos en otros lenguajes de programación LabVIEW cuenta con diferentes métodos como protocolos específicos del programa, usar la función *Call Library Function Node* para llamar librerías compartidas, o crear un CIN (*Code Interface Node*) que llama códigos escritos específicamente para conectar a programas en LabVIEW (VIs) [10] [12]. Se decide trabajar con la función *Call Library Function Node* puesto que esta permite manipular directamente las librerías compartidas, que en Windows reciben el nombre de *Dynamic Link Libraries* (DLL). De esta forma se puede cambiar fácilmente la librería sin necesidad de modificar el VI que se conecta con la DLL, simplificando así el proceso de adquisición de los datos.

La programación en LabVIEW inicia con el proceso de adquirir los datos mediante la utilización secuencial de la función *Call Library Function Node*. El modo de operación de la DLL para establecer la comunicación se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 3.

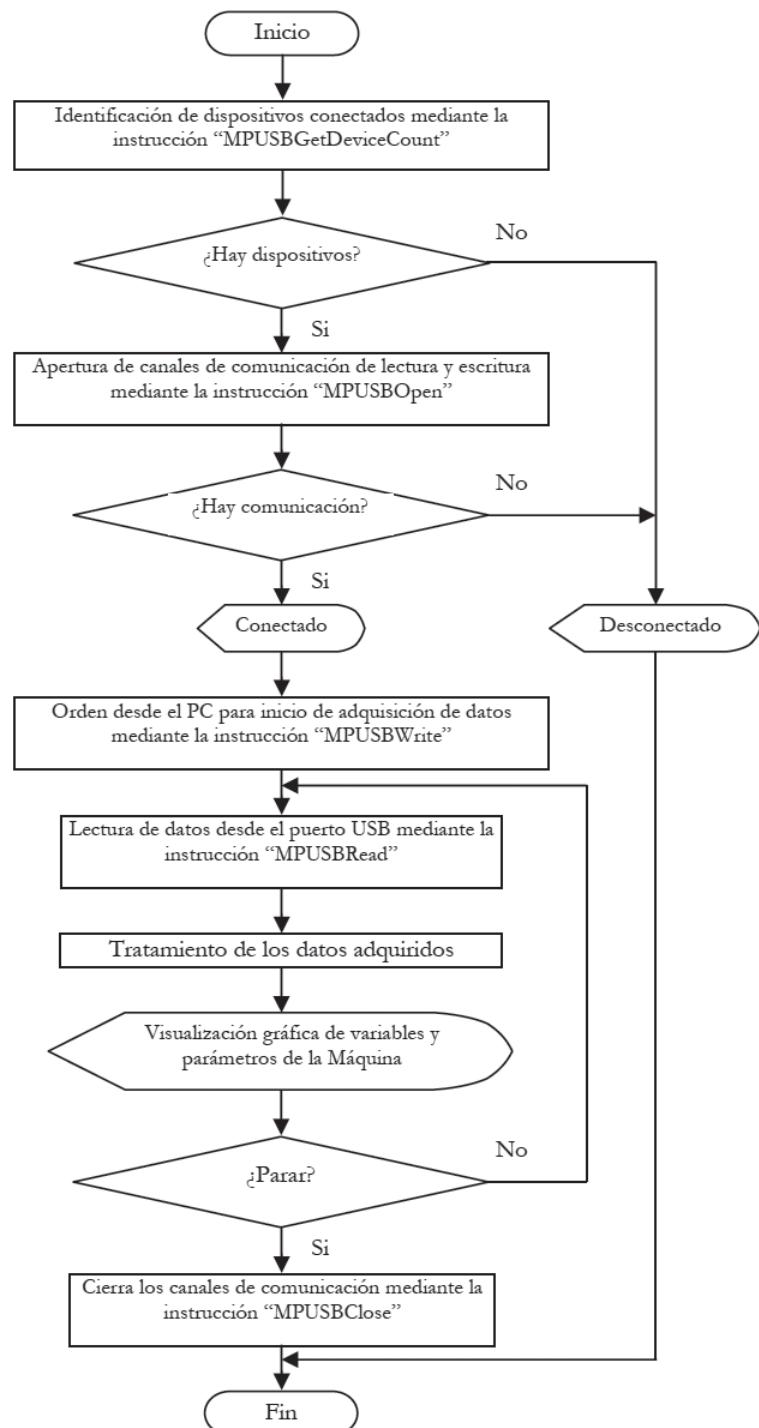


Figura 3. Diagrama de flujo de la comunicación microcontrolador-PC.

Los datos adquiridos se encuentran en un arreglo de 64 bytes que contiene los valores adquiridos de las cuatro variables capturadas. Estos datos son separados para cada variable y relacionados con la tensión de alimentación del microcontrolador (5V); luego son llevados al valor equivalente de la variable que se está observando. Con el acondicionamiento de los sensores y transductores especificados, y con la conversión analógico-digital a 8 bits, se especifica para cada señal el rango de medida definidos, la resolución obtenida y la constante de proporcionalidad entre la tensión de entrada del microcontrolador y la variable capturada, tal como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de las variables acondicionadas.

Señal	Rango de Medida definido	Resolución	Constante de proporcionalidad
Tensión	0 - 260 [V]	1,2 [V]	52
Corriente	0 - 12 [A]	0,06 [A]	2,38 A/V
Par	0 - 2,8 [Nm]	0,02 [Nm]	0,557 Nm/V
Velocidad	0 - 4000 [rpm]	18 [rpm]	800 rpm/V

Para el análisis en estado estable se toman los valores de cada variable y se arma una señal de tipo *waveform*, con el fin de obtener la componente continua de cada señal, utilizando el bloque *Basic Averaged DC-RMS*.

Puesto que un objetivo de este trabajo es brindar una herramienta que promueva formas alternativas en los procesos de enseñanza, se realiza un programa que permite determinar diversos parámetros de operación de la máquina tales como: potencia eléctrica y mecánica, pérdidas de potencia y eficiencia. La Tabla 3 resume las relaciones utilizadas entre las variables para el cálculo de estos parámetros.

Tabla 3. Relaciones utilizadas para el cálculo de los parámetros.

Parámetro	Relación Utilizada
Potencia Eléctrica	$P_{elec} = VI$
Potencia Mecánica	$P_{mec} = T_S \omega_m$
Perdidas de potencia	$P_{per} = P_{in} - P_{out}$
Eficiencia	$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%$

El programa le permite al usuario realizar diferentes gráficas de las variables adquiridas, así como entre las variables y los parámetros nombrados anteriormente. Ejemplo de lo anterior es la curva corriente vs. velocidad. Lo anterior, con el fin de observar en forma clara la relación existente entre estos, permitiendo además realizar la comparación del comportamiento de la máquina en sus diversas formas de conexión.

3. Resultados

Se presentan a continuación algunos de los resultados que está en capacidad de entregar el sistema de adquisición desarrollado, variando las características de operación de la máquina. La Figura 4 presenta la curva par vs. velocidad obtenida durante la variación de carga para la máquina, trabajando como motor en conexión *shunt*.

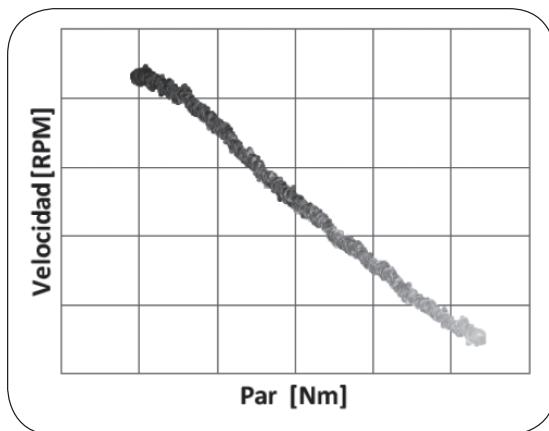


Figura 4. Curva Velocidad vs. Par del motor de corriente directa en conexión shunt.

La Figura 5 muestra el comportamiento de la variable velocidad en el arranque de la máquina trabajando como motor sin carga.

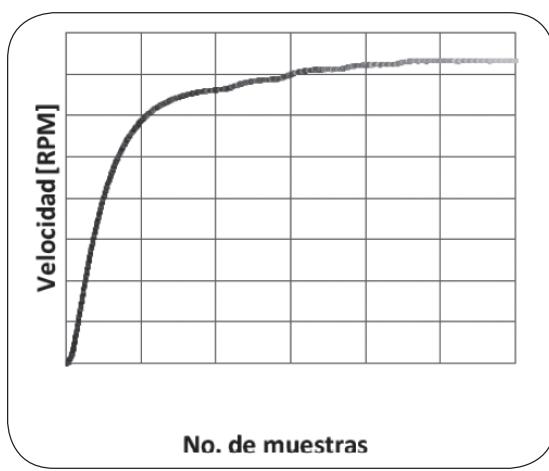


Figura 5. Curva de velocidad para el arranque de la máquina sin carga.

La Figura 6 muestra las curvas de corriente vs. velocidad para la máquina como motor en sus diferentes tipos de conexión (*shunt*, compuesta aditiva y sustractiva), encontrando las diferencias en el comportamiento de la máquina para cada

conexión. Es de anotar que para la construcción de este tipo de curvas la máquina debe ir ajustándose pausadamente una condición de operación a otra. Esto, debido a que el sistema está diseñado para monitorear los estados transitorios únicamente mediante la visualización, y no ofrece un valor medido de las variables durante estos estados.

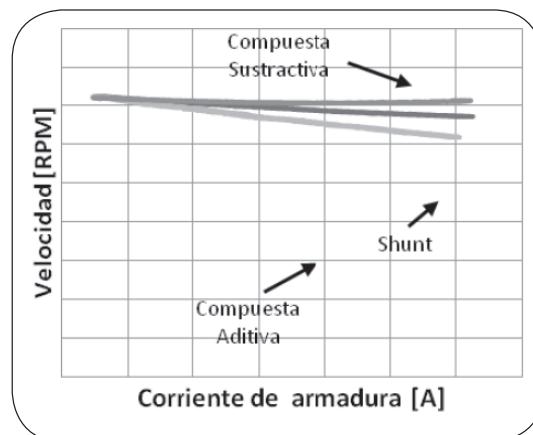


Figura 6. Curva de corriente vs. velocidad en conexión compuesta aditiva.

El resultado final es un sistema que ofrece al usuario la facilidad de comparar el comportamiento de la máquina en distintas conexiones, teniendo en cuenta sus principales características de funcionamiento.

Para el sistema de adquisición se desarrolla un manual de usuario en el cual se especifican las características técnicas del equipo, el procedimiento para la instalación del software de monitoreo, los circuitos desarrollados para la alimentación de los sensores y transductores, y el acondicionamiento requerido por las señales capturadas para la digitalización. También presenta la programación realizada en el microcontrolador para su conexión con el puerto USB y la adquisición de señal realizada mediante el software LabVIEW y la librería DLL de Microchip. Por último se presenta la programación en el software para la visualización de las variables adquiridas y el cálculo de los parámetros que caracterizan la máquina.

4. Conclusiones

Se implementó un sistema de adquisición de datos de bajo costo para monitorear las variables de tensión, corriente, par y velocidad de una máquina de corriente directa, brindando así una herramienta que es útil para la enseñanza no solo en el área de máquinas eléctricas, sino que permite a los usuarios involucrarse en el ámbito de la instrumentación y la programación con el fin de obtener cada vez un sistema más completo y que se ajuste a sus necesidades.

La utilización de los microcontroladores de la familia PIC18FXX5X como tarjeta de adquisición de datos resulta útil para monitorear y controlar sistemas o procesos de forma sencilla y económica, debido a que estos equipos son altamente comerciales. Además el soporte ofrecido en los portales de Internet de los fabricantes, y en general en la red, es de gran utilidad, brindando información referente a su programación, ejemplos de aplicación y últimas actualizaciones.

Con la herramienta entregada se pretende que los estudiantes, además de adquirir un conocimiento

más profundo y directo en cuanto al comportamiento de estas máquinas, se interesen por realizar mejoras al sistema desarrollado tales como desarrollar nuevos programas de instrumentación virtual que les permitan observar nuevas características de la máquina, por ejemplo, análisis de vibración o temperatura. Además se propone la posibilidad de realizar el control de las variables de la máquina teniendo en cuenta que el sistema de adquisición es bidireccional; es decir, que no solo lee datos desde el microcontrolador sino que permite escribir datos que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones. El sistema implementado permite obtener una medida de las variables en el estado estable. Sin embargo, para implementar un sistema que permita obtener una medida en el estado transitorio, se requiere utilizar un hardware de adquisición de datos robusto en el cual el muestreo realizado se encuentre sincronizado con el software de adquisición y permita una alta velocidad de muestreo.

Referencias bibliográficas

- [1] A. Manuel, D. Biel, J. Olivé, J. Prat, *Instrumentación Virtual: Adquisición, procesado y análisis de señales*. Barcelona: Ediciones UPC, 2001.
- [2] S. Creus, *Instrumentación Industrial*, Ed. 7. España: Marcombo, 2005.
- [3] E. Franco, J. Posada, J. Ramírez, “Banco de pruebas para motores de inducción”, *Revista Energía y Computación*, vol. 16, no. 1, pp. 43 – 49, jun. 2008.
- [4] Jerez, “Laboratorio virtual para el análisis predictivo de fallas en motores de inducción en baja potencia”, Trabajo de grado (Ingeniero eléctrico), Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Bogotá D.C., Colombia, 2008.
- [5] J. Cathey, *Máquinas Eléctricas: Análisis y diseño aplicando Matlab*. México: McGraw-Hill, 2002.
- [6] G. Bhag, H. Hüseyin, *Máquinas eléctricas y transformadores*. Ed. 3. México: Alfaomega, 2006.
- [7] T. Maloney, *Electrónica Industrial Moderna*, Ed. 3. México: Prentice-Hall, 1997.

- [8] R. Pallas, *Sensores y acondicionadores de señal*, Ed. 4. Barcelona: Marcombo, 2003.
- [9] E. García, *Compilador C CCS y simulador PROTEUS para Microcontroladores PIC*. Barcelona: Marcombo, 2008.
- [10] J. Lugo, G. Pool, “Integración de PIC18F2455 de Microchip™ con LabVIEW™ 8.2 de National Instruments™ con MPUSBAPI. DLL”, Trabajo (Maestría en Mecatrónica), Universidad Modelo, Yucatán, México, 2008.
- [11] G. Johnson, R. Jennings, *LabVIEW: Graphical Programming*, Ed. 4. USA: McGraw-Hill, 2006.
- [12] National Instruments. (2010). “LabVIEW™: Using External Code in LabVIEW”, National Instruments. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370109b.pdf>

Trabajo de laboratorio en física con sistemas de adquisición de datos: una propuesta para apoyar la formación de profesores de ciencias naturales

Sonia Y. López^{1*}, Mónica E. Cardona¹, Luis F. Ramírez² y Jaime A. Osorio²

(1) Facultad de Educación, Dpto. de enseñanza de las Ciencias y las Artes, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín-Colombia (correo-e: sonia.lopez@udea.edu.co; meliana.cardona@udea.edu.co).

(2) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Física, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín-Colombia (correo-e: luisf.ramirez@udea.edu.co; jaime.osorio@udea.edu.co).

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Jul. 24, 2020; Aceptado Sep. 29, 2020; Versión final Oct. 31, 2020, Publicado Abr. 2021

Resumen

El principal propósito de esta investigación es integrar, en la formación de maestros, herramientas tecnológicas que estén en mayor consonancia con los desarrollos propios de un área experimental como la física. Se implementó una propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, en la que se hizo uso de sistemas de adquisición de datos (SAD) en el trabajo práctico de laboratorio para la enseñanza de la física, en un programa de formación de profesores de ciencias naturales. Los resultados obtenidos muestran que el uso de SAD favoreció la conceptualización en términos de la evolución de las representaciones construidas por los participantes. Por lo que se considera que la implementación de dicha propuesta en cursos de formación inicial y continuada de profesores de ciencias naturales puede contribuir de manera importante a la conceptualización en física y a la apropiación crítica de herramientas tecnológicas como los SAD.

Palabras clave: trabajo de laboratorio; enseñanza de la física; formación de profesores; ciencias naturales; sistemas de adquisición de datos; conceptualización

Practical physics laboratories with data acquisition systems: a proposal to support science teachers training

Abstract

The main objective of this research study is to integrate the use of technological tools for experimental sciences (e.g. physics) in teacher training processes. A teaching proposal is built on the basis of the Vergnaud's Theory of Conceptual Fields, in which the data acquisition (DAQ) system is implemented in physics laboratory courses taken by the students enrolled in the biological science teacher program. The results show that DAQ improves student conceptualization processes in representation evolution. It is concluded that implementing the proposal presented here in the initial stages and throughout the entire biological science teacher program can contribute to conceptualization in physics and to endorsing technological systems (e.g. DAQ) used in science.

Keywords: practical; laboratory; physics teaching; science teachers training; data acquisition system; conceptualization

INTRODUCCIÓN

No se niega la importancia que el trabajo de laboratorio tiene en la enseñanza de las ciencias y de manera particular, en la enseñanza de la física. No obstante, éste ha sido objeto de críticas desde sus inicios hasta la actualidad. Tal y como lo plantean Chia-Yu et al. (2017), los laboratorios de física en la educación secundaria tienen dos problemas esenciales: seguir las instrucciones del laboratorio paso a paso, de manera que los estudiantes se centran en ajustar los datos experimentales; y el otro problema se refiere a que la mayoría de los métodos de registro de datos son lentos, lo que dificulta el número de muestras que pueden ser tomadas y su precisión. Pero estas no son dificultades que se limiten exclusivamente a la escuela secundaria; pues también se presentan a nivel universitario; y de manera concreta en los programas de formación de maestros.

En lo que se refiere a estos programas de formación, desde este trabajo se pretende hacer un aporte a partir de la integración de herramientas tecnológicas que apoyen el trabajo experimental en el laboratorio de física; partiendo del hecho de que la formación de maestros debe estar dirigida a generar reflexiones en relación con el uso pedagógico de herramientas, recursos, programas, servicios y entornos caracterizados por el uso de la tecnología (Hepp et al., 2015); y que la adquisición de competencias digitales por parte de los docentes, sugiere una mejora significativa en los procesos de enseñanza (Instefjord y Munthe, 2017). En este sentido, las herramientas tecnológicas se han ido incorporando lentamente a la actividad docente, y la percepción que los docentes tienen del rol de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y de su importancia en las actividades académicas incide en la apropiación de dichas herramientas (Tapasco y Giraldo, 2017). Apropiación que se ve favorecida por las múltiples posibilidades que estas tecnologías ofrecen para el proceso de aprendizaje, como son la accesibilidad, interactividad y flexibilidad; y que las convierte en aliados poderosos de las nuevas estrategias de aprendizaje (Cózar-Gutiérrez et al., 2016).

Y en cuanto a las potencialidades de las TIC para apoyar el trabajo de laboratorio en física, es preciso referirse a la manera en que estas pueden facilitar el proceso de toma de datos, favorecer la conceptualización y el interés y motivación de los estudiantes para asumir un papel activo en los procesos de aprendizaje (Villarreal-Villa et al., 2019). Y en consonancia con Munro (2018), quien plantea que las estrategias para incorporar la tecnología en la educación superior desempeñan un factor determinante para su adecuada implementación; se propone el uso de Sistemas de Adquisición de Datos (SAD); considerando que diferentes autores (Galeriu et al., 2015; Arnold et al., 2015; de Castro et al., 2015) valoran su papel en la comprensión de fenómenos físicos en campos conceptuales como la cinemática, el electromagnetismo, la óptica y la mecánica de fluidos.

En este trabajo se utiliza un Sistema de Adquisición de Datos basado en Arduino a nivel de software y de hardware, como una alternativa simple y de bajo costo para el trabajo de laboratorio en física (Bouquet et al., 2017; Sari, 2019; Moya, 2018). Una de las principales ventajas de este recurso es que se basa en código abierto, y con él los estudiantes podrán observar una mayor variedad de fenómenos y analizarlos de una manera más expedita. Atendiendo a lo anterior y al hecho de que no se han desarrollado muchos estudios que reflexionen sobre el papel de estas herramientas en la formación de profesores de ciencias y su potencial para la comprensión de conceptos físicos, y que los trabajos existentes se han concentrado más en el uso netamente instrumental de estas herramientas; se propone aquí el estudio del concepto de capacitancia a partir del análisis del proceso de carga de un condensador mediante un SAD, y se busca responder a la pregunta: ¿Cuál es la contribución de una propuesta de enseñanza con uso de SAD para la conceptualización en el trabajo de laboratorio en física?

OTROS ANTECEDENTES

El fundamento teórico de este estudio lo constituyen la Teoría de los Campos Conceptuales de Gerard Vergnaud, la concepción del trabajo práctico de laboratorio para la formación de maestros de ciencias y el uso de Sistemas de Adquisición de Datos (SAD) en los trabajos de laboratorio para la enseñanza de la física.

Teoría de los Campos Conceptuales

Esta teoría formulada por Vergnaud (1990), se apoya en la teoría del Desarrollo Cognitivo de Piaget, ampliando el concepto de esquema; y en la teoría de Vygotsky, dándole importancia a la interacción social, al lenguaje y a la simbolización en el progresivo dominio de un campo conceptual. Para Vergnaud, la conceptualización es el núcleo del desarrollo cognitivo y considera que el conocimiento está organizado en campos conceptuales, los cuales se definen como un conjunto de situaciones, conceptos, relaciones, tareas cognitivas, operaciones y procedimientos que se ponen en juego en el proceso de conceptualización. La esencia de este referente teórico se encuentra en la conceptualización, entendida como un proceso que implica la interacción permanente entre las situaciones, que se definen como una combinación de tareas que involucran procesos cognitivos complejos; y los esquemas, que se entienden como “la organización invariante de la conducta para una clase de situaciones dada” (Vergnaud, 1990).

Entre los elementos cognitivos de los esquemas se encuentran metas, reglas de acción, inferencias e invariantes operatorios; siendo estos últimos de particular interés, dado que su función es identificar las propiedades, relaciones y transformaciones de los objetos, seleccionar la información pertinente para establecer las reglas de acción que permitirán abordar una situación (junto con los conceptos y las representaciones). Los invariantes operatorios están constituidos por los conceptos en acción y teoremas en acción; un teorema en acción es una proposición considerada como verdadera, mientras que un concepto en acción es una categoría de pensamiento que se cree pertinente. En este sentido, esta teoría permite analizar la relación entre conceptos y conocimientos que los sujetos ponen en acción frente a determinadas situaciones, y entre los significantes y significados de un concepto (Llancaqueo et al., 2003).

Con respecto a los conceptos, Vergnaud plantea que están constituidos por un conjunto de situaciones, invariantes operatorios y sus propiedades, que se pueden expresar a través de diferentes representaciones simbólicas (Vergnaud, 1990). Las situaciones corresponden a la realidad; es decir, lo que da sentido al concepto; los invariantes operatorios son el significado del concepto, en los que se basa la operacionalidad de los esquemas; y las representaciones son un conjunto de formas de lenguaje que ayudan a representar simbólicamente un concepto (representaciones simbólicas gráficas, lingüísticas, pictóricas y analíticas de magnitudes relacionadas); es decir, constituyen su significante.

Dado que los invariantes operatorios son considerados conocimientos implícitos que un estudiante tiene y se le dificulta externalizar; es a través de las representaciones (lenguaje natural, gráficos y diagramas, sentencias formales, etc.), que podría lograrse que un sujeto manifieste los conceptos que ha construido y los procedimientos que utiliza para abordar las situaciones propuestas. Es entonces a través de las situaciones que un concepto adquiere sentido para un sujeto; de esta manera “podrá asimilar las propiedades que formarán sus conceptos-en-acción y teoremas-en-acción, o en forma resumida sus conocimientos-en-acción, que en la medida que sean expresados en forma explícita mediante sus significantes, esos invariantes o conocimientos-en-acción pasan a conformar el concepto de un individuo” (Llancaqueo et al., 2003).

En el marco de esta investigación se retomaron las situaciones para el diseño de los trabajos de laboratorio que hacen parte de la propuesta de enseñanza aquí presentada; y el proceso de conceptualización de los profesores de ciencias en formación se analiza a la luz de las representaciones que fueron utilizadas por ellos a lo largo de la intervención.

El trabajo de laboratorio en la enseñanza de las ciencias

En la enseñanza de las ciencias naturales y de la física en particular, ha sido amplia la discusión sobre lo que debería considerarse como trabajo de laboratorio o actividad experimental en el ámbito formativo. Gudyanga y Jita (2019), señalan que a través del trabajo práctico de laboratorio los estudiantes pueden tener experiencias reales sobre el mundo natural; sin embargo, su implementación actual no tiene objetivos claros y a menudo se presentan múltiples enfoques para alcanzar dichos objetivos; obteniendo resultados muy bajos en el aprendizaje de los estudiantes, que resultan decepcionantes cuando se compara con la inversión de tiempo y recursos para los laboratorios.

Teniendo en cuenta la diversidad de estrategias que se utilizan en la clase de ciencias, Caamaño (2004) clasifica los trabajos prácticos de laboratorio como: experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones. Las experiencias buscan una familiarización perceptiva con los fenómenos; los experimentos ilustrativos están enfocados a exemplificar principios, comprobar leyes o mejorar la comprensión de los conceptos; los ejercicios prácticos ayudan a desarrollar habilidades científicas a través de actividades de experimentación; y las estrategias de investigación se componen de actividades que buscan dar a los estudiantes la oportunidad de resolver problemas de carácter científico.

Asumir el trabajo práctico como una actividad investigativa llevada al ámbito de la enseñanza, favorece la familiarización de los estudiantes con el trabajo científico y el desarrollo de habilidades y procedimientos propios de la ciencia (Caamaño, 2004). Desde la perspectiva de este autor, en el presente estudio se asume el trabajo de laboratorio como un proceso de investigación, donde las actividades están diseñadas para que los profesores en formación se enfrenten a la resolución de situaciones problema, considerando que estas ayudan a desarrollar habilidades experimentales y brindan la posibilidad de establecer relaciones entre la teoría y los modelos con la experiencia, como una oportunidad para la adquisición de aprendizajes significativos (Jaime y Escudero, 2011).

Uso de Sistemas de Adquisición de Datos

El uso de SAD ha sido hasta el momento una modalidad poco explorada para la formación de profesores de física, posiblemente porque existe un desconocimiento acerca de su potencial para apoyar el trabajo de

laboratorio, en relación con: agilidad en el proceso de recolección de información; fortalecimiento de habilidades que serían difíciles de desarrollar mediante las prácticas de laboratorio tradicionales; y la posibilidad de tener una imagen más amplia del fenómeno a estudiar, al disponer de datos de manera casi inmediata y de gráficos que muestran la relación entre las variables involucradas en una situación (Haag et al., 2005; Enrique y Alzugaray, 2013).

En la literatura se ha encontrado que la mayoría de los estudios que hacen uso de los SAD en los trabajos de laboratorio, emplean sensores y placas de tipo Arduino (Chen et al., 2014; Kuan et al., 2016; Abdusselam y Karal, 2020). Gracias a esta herramienta, los estudiantes tienen la oportunidad de realizar actividades a las que comúnmente tienen poco acceso, como el diseño de diferentes montajes experimentales, utilizar software para el procesamiento de datos, realizar mediciones y elaborar gráficas en un tiempo reducido, así como disponer de mayor tiempo para interpretar y analizar el desarrollo del trabajo de laboratorio (Cardona y López, 2017). Un SAD se conforma por un dispositivo de medición que permite que los datos obtenidos con sensores sean leídos y analizados por un software computacional. El SAD requiere de un sensor para convertir alguna cantidad física - tal como la temperatura, la fuerza, la presión - en una señal eléctrica que se suministra a continuación al computador para la recolección y análisis de datos (Haag et al., 2005). En la Figura 1 se representan las etapas de un SAD.

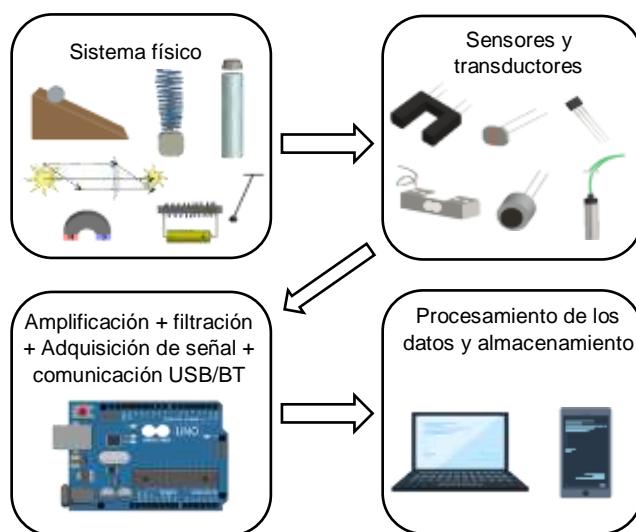


Fig. 1: Etapas de un Sistema de Adquisición de Datos como el empleado en este estudio

METODOLOGÍA

Se realizó una investigación cualitativa con un enfoque descriptivo e interpretativo, desde la perspectiva del estudio de caso instrumental (Stake, 2010); de modo que los resultados son válidos para el grupo de participantes que conforman el caso, sin intención de hacer generalizaciones. Los participantes fueron 14 futuros profesores de ciencias (cinco hombres y nueve mujeres), matriculados en el curso Física III (física de los campos), correspondiente al cuarto nivel de la Licenciatura en Ciencias Naturales de la Universidad de Antioquia, Colombia. Para identificarlos en el análisis de la información se utilizaron los códigos P1 a P14. Es importante resaltar que para la recolección de datos se realizó una contextualización inicial a los participantes, en la que se comunicó el propósito y resultados esperados. Asimismo, atendiendo a las consideraciones éticas de la investigación, cada uno de ellos firmó un consentimiento informado para autorizar el uso de los datos registrados.

Diseño e implementación de la propuesta de enseñanza

Fue diseñada una propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud (1990), con el propósito de conocer el proceso de conceptualización de los profesores de ciencias en formación a través de un trabajo de laboratorio apoyado en el uso de SAD. Para ello, se consideraron algunos momentos contemplados por el Modelo de Aprendizaje en los Trabajos de Laboratorio de Física MATLaF (Andrés et al., 2006), que fue elaborado para identificar el desarrollo cognitivo de los estudiantes al enfrentarse a situaciones experimentales novedosas. Al adaptar este modelo a la propuesta de enseñanza implementada en este estudio, se proponen tres momentos principales: diagnóstico, intervención y evaluación del nivel de conceptualización final; que se corresponden con tres de las cuatro fases del MATLaF, consideradas de mayor relevancia para la presente investigación, a saber: 1) identificación de invariantes

operatorios iniciales asociados al campo conceptual; 2) identificación de invariantes operatorios asociados con las subtareas propiamente experimentales; y 3) evaluación de los aprendizajes logrados.

La implementación de la propuesta de enseñanza tuvo una duración de cuatro semanas con una intensidad horaria de dos horas semanales. En la Tabla 1 se sintetizan los momentos, actividades (codificadas como A1 a A4) y propósitos de la intervención; y posteriormente se profundiza en la descripción de estos elementos.

Tabla 1: Momentos para la recolección de información, actividades y propósitos

Momento de la intervención	Duración	Actividades	Propósito
Diagnóstico o estado inicial (Fase 1 MATLaF)	Una sesión de dos horas	Solución de cuestionario sobre el concepto de capacitancia (A1). Experimento ilustrativo sobre carga de un condensador (A2)	Conocer los conceptos y los teoremas en acción iniciales.
Intervención o estado intermedio (Fases 2 y 3 MATLaF)	Dos sesiones de dos horas cada una	Trabajo de laboratorio sobre el proceso de carga de un condensador (A3)	Obtener evidencias acerca de las representaciones simbólicas generadas en relación con los conceptos y las situaciones.
Evaluación del nivel de conceptualización final (Fase 3 MATLaF)	Una sesión de dos horas	Informe final tipo artículo y socialización (A4)	Identificar la evolución de las representaciones asociadas al concepto.

Primer momento: diagnóstico o estado inicial

El primer momento comenzó con la respuesta de manera individual a un cuestionario (A1) que indagaba por sus conocimientos previos acerca del proceso de carga de un condensador. Posteriormente se hizo un experimento ilustrativo donde cada participante realizó una representación gráfica del fenómeno y respondió por escrito dos preguntas relacionadas con lo observado (A2). El experimento consistió en conectar en serie un condensador, una resistencia, un led y una batería de 9V para observar qué sucedía al cerrar el circuito. En el uso de baterías (corriente continua), el flujo de electrones carga las placas del condensador y el LED permanece encendido; esta situación se mantiene hasta que el flujo de electrones se detiene (la corriente deja de circular) comportándose el condensador como un circuito abierto para la corriente continua (no permite el paso de corriente) y por ende el LED se apaga. Este experimento con corriente continua es de una gran riqueza observacional para los participantes, en la medida en que favorece la comprensión de conceptos como capacitancia y corriente eléctrica mediante un circuito RC simple en corriente directa.

Las preguntas planteadas a los participantes fueron: 1) desde el punto de vista físico, ¿qué cree que sucede en el fenómeno?, y 2) ¿qué conceptos, ideas, teorías, considera que son pertinentes para abordar la situación? Al final de este primer momento se realizó una presentación a los participantes sobre el uso y funcionamiento de los SAD, explicando en qué consistían y mostrando diferentes tipos de sensores y su utilidad.

Segundo momento: intervención o estado intermedio

Durante este momento se realizó un trabajo de laboratorio (A3) en grupos de dos y tres participantes, orientado al estudio cuantitativo del proceso de carga de un condensador, donde los participantes debieron realizar mediciones del voltaje en el condensador en función del tiempo, para deducir el tiempo de carga, hacer una descripción cuantitativa del fenómeno y fortalecer conceptos como corriente eléctrica, capacitancia, voltaje, etc. En el experimento ilustrativo (A2) realizado en el primer momento, los participantes observaron cómo el led del circuito solo encendía mientras el condensador se estaba cargando y cómo el tiempo que duraba encendido aumentaba con el valor de la capacitancia. Mientras que, en este segundo momento los participantes midieron la curva de voltaje en el condensador en función del tiempo haciendo uso del SAD; con el fin de describir cuantitativamente el proceso de carga del condensador, logrando percibir que el voltaje en este elemento aumenta de forma exponencial en el tiempo desde V_0 hasta el valor de voltaje de la fuente que lo cargó.

Luego de identificar e interpretar la curva obtenida, la contrastaron con el modelo teórico reportado en la literatura (ecuación 1) con el fin de calcular la constante conocida como tiempo de carga. Al final pudieron comparar los resultados numéricos con la observación cualitativa del primer momento.

$$V_c = V_0(1 - e^{-t/RC}) \quad (1)$$

En esta ecuación, V_c es el voltaje en el condensador, V_0 el voltaje aplicado al circuito, R la resistencia, C la capacitancia y t el tiempo.

El SAD empleado en este segundo momento consta de una tarjeta Arduino configurada para la conexión de sensores y circuitos externos; en este caso un circuito RC en serie. La aplicación del voltaje V_0 y la medición del voltaje en el condensador V_c se llevan a cabo en la misma tarjeta, de modo que solo hay que realizar las conexiones que se muestran en la Figura 2. Una vez comienza el proceso de carga, las parejas ordenadas (voltaje, tiempo) son enviadas a través de conexión Bluetooth a un dispositivo Android con una aplicación de terminal instalada. Los datos son guardados o compartidos en la aplicación para su posterior análisis, usando un software de hoja de cálculo.

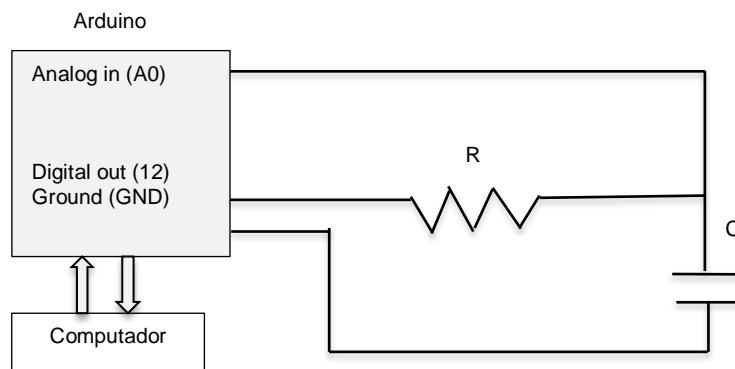


Fig. 2: Circuito RC conectado a un sistema de adquisición de datos basado en Arduino.

Tercer momento: evaluación del nivel de conceptualización final

En este momento se socializaron las experiencias de los participantes en relación con el trabajo de laboratorio. Adicionalmente, los participantes propusieron realizar una actividad para cargar el condensador por medio de un solenoide en el que se generaba corriente eléctrica a través de inducción electromagnética; observando lo que sucedía al utilizar diferentes imanes, solenoides o circuitos. En este mismo momento, se implementaron diferentes estrategias como el aprendizaje colaborativo y el informe de laboratorio en formato de artículo científico que contenía elementos como: introducción, marco teórico, metodología, resultados y conclusiones (A4); con el propósito de identificar las representaciones que daban cuenta de los invariantes operatorios de los participantes al final de la intervención, permitiendo así analizar la evolución de dichas representaciones.

Análisis de la información

Con base en los diferentes instrumentos utilizados en la implementación de la propuesta de enseñanza, fue posible analizar los resultados a la luz de representaciones de tipo simbólico, gráfico y lingüístico, que daban cuenta de los invariantes operatorios (conceptos en acción y teoremas en acción) de los participantes al enfrentarse a una situación novedosa. En la Tabla 2 se muestra una clasificación de las representaciones, a partir de la cual se valoran los procesos de conceptualización inicial y final.

Tabla 2: Clasificación de las representaciones

Pertinentes	Aceptables	Deficientes
Las representaciones dan cuenta de la comprensión de los significados y las propiedades de los conceptos. Se describen los procedimientos que permiten solucionar una situación.	Las representaciones explican parcialmente los conceptos. Los procedimientos para solucionar una situación se describen de manera confusa.	Las representaciones no reflejan una comprensión de significados y propiedades de los conceptos. No se describen los procedimientos para solucionar una situación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan aquí los principales resultados del estudio haciendo énfasis en la conceptualización lograda por los maestros en formación, en términos de las representaciones que permitieron explicitar los invariantes operatorios utilizados por ellos para resolver las situaciones propuestas, así como la comprensión lograda sobre el concepto de capacitancia. De esta manera, se identificaron las representaciones iniciales y finales relativas al proceso de almacenamiento de energía en un condensador y a las relaciones entre el tiempo de carga y capacitancia, para determinar el nivel en el que se encontraban atendiendo a la clasificación presentada en la Tabla 2. El propósito de dicha clasificación, de acuerdo con autores como Llancaqueo et al. (2003), es identificar a la luz de la teoría de Vergnaud, las relaciones de conocimiento entre las situaciones y las respuestas (teoremas y conceptos en acción) de los participantes.

Representaciones sobre el proceso de almacenamiento de energía

Durante el primer momento de la implementación de la propuesta de enseñanza, las representaciones fueron clasificadas como aceptables; dado que exhibían parcialmente propiedades referentes al concepto. En la Tabla 3 se muestran algunas representaciones de tipo lingüístico seleccionadas del diagnóstico, que dan cuenta de las respuestas a la pregunta en A1 sobre ¿cómo es el proceso de almacenamiento de energía en un condensador? De estas representaciones son inferidos algunos invariantes operatorios (conceptos en acción y teoremas en acción).

Tabla 3: Representaciones iniciales de los participantes sobre el almacenamiento de energía en un condensador

Representaciones	Invariantes operatorios	
	Teoremas en acción	Conceptos en acción
"En 2 placas de algún material conductor se almacenan en una placa los protones y en la otra los electrones y se puede poner entre ambas un elemento dieléctrico aislante que al momento de necesitarse por las cargas de las placas se produce una corriente eléctrica" (P1).	Las placas de un condensador son de un material conductor y cada placa almacena un tipo de carga diferente.	Protones (P1) Carga eléctrica (P14)
"El condensador en el interior tiene un material (dieléctrico) que al enrollarse permite que se almacene mayor número de electrones" (P4).	El dieléctrico entre las placas es un aislante al cargar el condensador, pero un conductor al descargarlo.	Corriente eléctrica (P1, P2, P12) Condensador (P2, P4) Dieléctrico (P4) Electrones (P1, P4, P14)
"En un condensador entra energía almacenándose. Al llegar a su límite permanece cargado y la corriente continúa fluyendo" (P2)	El dieléctrico permite un mayor almacenamiento de electrones.	Energía (P2, P12, P14) Capacitancia (P12)
"La corriente llega hasta el condensador y se almacena tanta energía como lo permite su capacitancia, impidiendo el paso de la corriente hasta este punto" (P12).	Un condensador almacena energía. Al llegar al límite de almacenamiento, la corriente continúa fluyendo.	
"La energía se almacena del modo: a) se da un paso de electrones desde la fuente de energía, b) estos electrones "pasan" por medio de un material conductor, c) una vez allí se permite que las cargas sean depositadas en placas generando un campo eléctrico homogéneo en cualquier punto" (P14).	Existe un límite para el almacenamiento de energía en un condensador. Durante la carga la corriente se detiene.	
	Los electrones viajan desde la fuente de energía a través de un material conductor, luego se depositan en las placas del condensador generando un campo eléctrico homogéneo.	

Las expresiones en la tabla 3 reflejan las ideas de los participantes sobre el proceso de carga de un condensador, refiriéndose al almacenamiento de carga eléctrica en las placas que lo conforman y a la dependencia entre la cantidad de carga que se puede almacenar y la capacitancia. Asimismo, se afirma que el dieléctrico es un aislante entre las placas; y en las expresiones de P4, P12 y P14, se observa una noción de capacitancia cercana a la científica. Por el contrario, P1 tiene una concepción alejada de lo que sucede en el proceso de almacenamiento de carga; idea que persistió durante la implementación de la propuesta. De otro lado, en las representaciones de tipo gráfico, los participantes describen superficialmente algunos pasos relacionados con el proceso de almacenamiento del condensador, pero que reflejan el reconocimiento de algunos conceptos propios de este proceso, como se observa en la Figura 3.

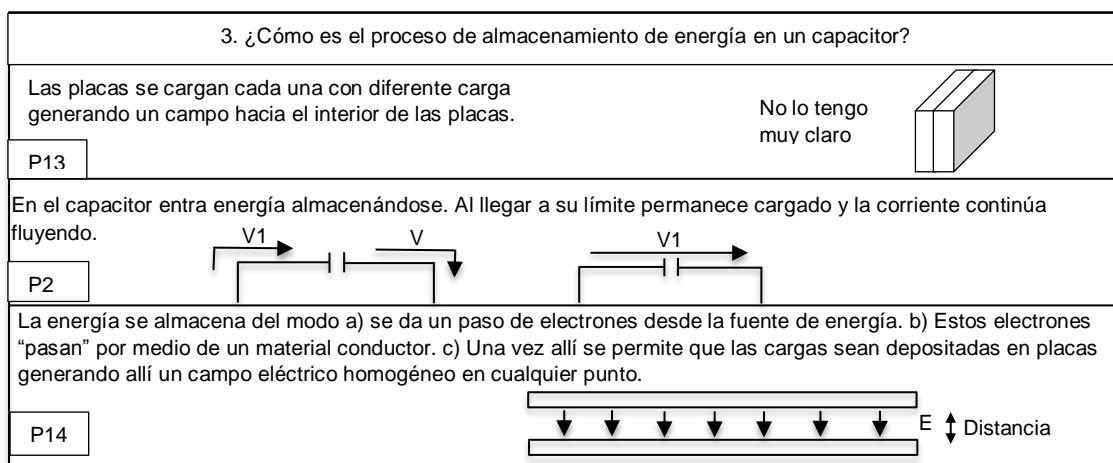


Fig. 3: Representaciones de los participantes sobre el proceso de carga de un condensador

Puede observarse que las representaciones de los participantes en la Figura 3 describen el proceso de almacenamiento de energía de un condensador como el transporte de electrones entre dos placas de material conductor. No obstante, en sus representaciones se identifican algunas concepciones erradas; una de ellas se refiere al hecho de que el participante P2 ubica las flechas del flujo de corriente en el circuito y las nombra como voltaje; y otra tiene que ver con que ninguno de los participantes hace referencia al trabajo que implica dicho transporte para vencer las fuerzas eléctricas generadas en el condensador. Por otra parte, en la Figura 4 se muestran las representaciones gráficas de los participantes sobre lo que creían que sucedía al cerrar el circuito del experimento ilustrativo realizado en el diagnóstico.

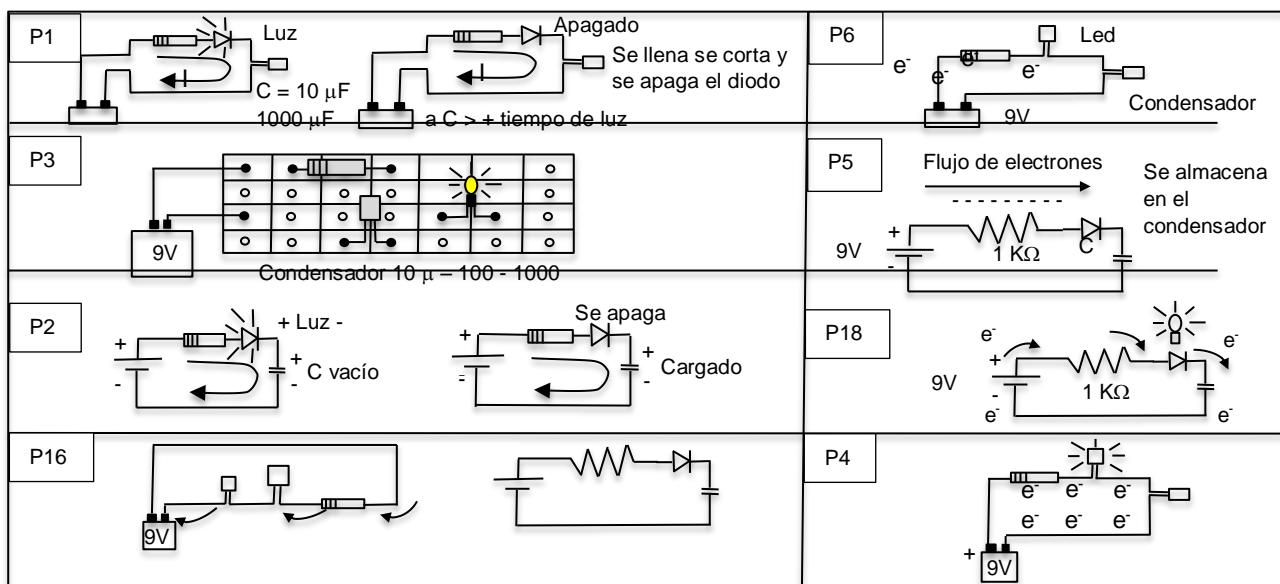


Fig. 4: Representaciones de los participantes sobre el proceso de carga de un condensador en el experimento ilustrativo

Como se observa en la Figura 4, recurrentemente los participantes realizaron el esquema habitual de un circuito en serie, similar a los presentados en libros de texto; sin embargo, añadieron elementos diferentes como los símbolos + y -, para representar la polaridad de la batería, el led y el condensador; además usaron e⁻ para representar electrones alrededor del circuito, y algunos incluyeron flechas para dar una idea de la dirección de la corriente. Los participantes P1 y P2 hacen una primera representación pertinente del fenómeno, al dibujar claramente el circuito con la corriente que fluye hasta que el condensador se carga y durante ese tiempo el LED ilumina; y en la segunda representación, ambos participantes indican que ya el condensador está cargado y el LED se apaga; sin embargo, siendo la corriente igual a cero, dibujan la flecha que la indica, generando un poco de confusión. Los otros participantes sólo representan el proceso de carga del condensador. La ausencia de explicaciones que acompañen las representaciones gráficas, puede ser interpretada desde la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, y de manera similar a lo reportado por Llancaqueo et al. (2003), como una dificultad en la explicitación de los sujetos mediante el lenguaje, de situaciones que implican un mayor nivel de conceptualización.

Durante el segundo y tercer momento de la implementación de la propuesta de enseñanza los participantes explicitaron (por medio de representaciones lingüísticas) su comprensión sobre las situaciones propuestas en el trabajo de laboratorio y lo registraron en el informe final tipo artículo (A4); una alternativa de evaluación que se propone, atendiendo a la necesidad de generar estrategias que sugieran cómo evaluar el desempeño de los estudiantes en el laboratorio (Gobaw y Atagana, 2016); y en el cual se observó que expresaron los conceptos construidos con mayor claridad, logrando un dominio conceptual de la situación relacionada con el proceso de almacenamiento de energía en un condensador. Estos resultados coinciden con los planteados por Moya (2018), quien considera que la implementación de actividades con sistemas de adquisición de datos haciendo uso de Arduino, puede proporcionar a un estudiante de física una mejor comprensión de los conceptos de carga eléctrica y almacenamiento de energía en condensadores. Algunos participantes representaron el proceso de almacenamiento de energía en un condensador a través de la descripción del fenómeno, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4: Representaciones de los participantes sobre el almacenamiento de energía en un condensador

Grupos de participantes	Representaciones
P1, P2 y P3	"Cuando el condensador almacenaba e igualaba la carga del circuito, este detenía el movimiento de electrones cerrando el flujo de voltaje y por esto se apagaba, este mismo procedimiento lo realizamos con condensadores de mayor capacidad, de lo que observamos que el tiempo de luz que producía el LED era mayor, pero casi imperceptible ya que aumentaba también en centésimas de segundo"
P4, P5 y P6	"Durante el proceso de carga de un condensador [...] se establece una diferencia de potencial eléctrico entre las placas y el campo eléctrico, por el cable hace fluir los electrones en sentido de negativo a positivo [...] durante el proceso de descarga cuando se conectan por fuera las dos placas (por ejemplo, mediante el cable conductor), la diferencia potencial entre ellas produce un campo eléctrico que hace fluir a los electrones de la placa con carga negativa hacia la placa con carga positiva"
P7, P8 y P9	"Al observar cuando el led emite luz o no, puede establecerse si el condensador se encuentra cargado o en proceso de cargarse"

Posteriormente, los participantes realizaron un ejercicio práctico para cargar el condensador por medio de un solenoide en el que se generaba corriente eléctrica a través de inducción electromagnética. Algunos de ellos tomaron decisiones en cuanto a las diferentes posibilidades para cargar el condensador, identificaron cómo se relacionaba el campo magnético generado por los imanes con la corriente en los solenoides; y tuvieron más tiempo para relacionar los conceptos abordados previamente, llegando a conclusiones como las que se presentan en la Tabla 5. Estas representaciones dan cuenta de algunos invariantes operatorios de los participantes en el momento final de la implementación de la propuesta de enseñanza.

Tabla 5: Representaciones de los participantes en A3 y A4 sobre el proceso de almacenamiento de energía

Representaciones	Invariantes operatorios	
	Teoremas en acción	Conceptos en acción
"El experimento para cargar un condensador [...] aprovecha la perturbación del campo eléctrico para producir una corriente eléctrica. El voltaje almacenado dependerá de la rapidez en el cambio del campo eléctrico y del área transversal del solenoide" (P4, P5 y P6).	La corriente eléctrica se produce a partir de la perturbación del campo eléctrico generado en un solenoide inducido magnéticamente. El voltaje en el condensador depende de la rapidez en el cambio del campo eléctrico y del área transversal del solenoide.	Condensador (P4, P5, P6, P7, P8, P9) Inducción electromagnética (P4, P5, P6, P7, P8, P9) Campo eléctrico (P4, P5, P6) Corriente eléctrica (P4, P5, P6, P7, P8, P9)
"Un condensador tiene la posibilidad de almacenar energía gracias a los dos conductores que lo conforman, una forma eficiente de cargar un condensador es utilizando un generador de inducción electromagnética el cual, gracias al campo magnético que se puede formar con los imanes, creará una corriente eléctrica que será introducida en el circuito hasta ser almacenada por el condensador, en este vemos cómo se fusiona el campo magnético con la corriente eléctrica" (P7, P8 y P9).	La corriente eléctrica se produce a partir del campo magnético generado en un solenoide inducido magnéticamente. Dicha corriente fluye por el circuito y se almacena en el condensador.	Campo magnético (P7, P8, P9, P10, P11, P12) Energía (P7, P8, P9) Voltaggio (P4, P5, P6, P10, P11, P12)
"Para generar una mayor diferencia de potencial pueden modificarse diferentes variables; una de ellas sería la velocidad a la cual entra el imán al solenoide para generar el campo magnético; otra manera sería aumentar el área y las espiras del solenoide, siendo ambas directamente proporcionales al voltaje" (P10, P11 y P12).	Las variables que influyen en el cambio de voltaje son: la velocidad del imán al interior del solenoide, el área transversal del solenoide y su cantidad de espiras.	Diferencia de potencial (P10, P11, P12)

Las representaciones identificadas en A4 se consideran pertinentes para el 65% de los participantes (P4 a P12), porque al compararlas con las iniciales, se observa cómo ha evolucionado la capacidad de describir el fenómeno matemáticamente; aunque aún presentan una confusión entre el campo “eléctrico” y el “magnético”, pues la inducción electromagnética se da por la variación del campo magnético en la región del solenoide, y ellos consideran que se debe al campo eléctrico. Así mismo, en la segunda y tercera representación de la Tabla 5 también se observa una mayor apropiación del lenguaje físico al establecer proposiciones más coherentes entre las distintas variables del ejercicio práctico; aunque persiste una dificultad al considerar que es el campo magnético y no su variación, lo que da lugar al fenómeno de inducción electromagnética. No obstante, en estas afirmaciones se identifican las propiedades del proceso de almacenamiento de energía de un condensador a través de la inducción electromagnética, favoreciendo en los participantes la selección de información pertinente para resolver la situación; así como la visualización de sistemas físicos reales a partir del uso de SAD, que difieren de las representaciones estáticas de los mismos sistemas en otros medios como los libros de texto. El 35% restante (P1, P2, P3, P13 y P14) permaneció en un nivel aceptable, porque en la descripción del proceso de almacenamiento de energía del condensador, explicaban parcialmente los conceptos necesarios para dar cuenta de un dominio de la situación.

Representaciones relativas a las relaciones entre tiempo de carga y capacitancia

Las representaciones lingüísticas que explicitaban los invariantes operatorios iniciales identificados en A2 para el 21% de los participantes (P1, P5 y P9), se encontraban en un nivel deficiente; debido a que no establecían relaciones coherentes entre las magnitudes involucradas en la situación y no trascendieron el nivel descriptivo del experimento. Dichas representaciones se muestran en la Tabla 6; donde se puede observar que dos de los participantes establecen una relación inicial entre tiempo de carga y capacitancia, refiriéndose a esta última como “tamaño” (P5) o “capacidad del condensador” (P1); y P9 realiza una descripción de cada uno de los componentes del experimento, haciendo referencia a sus funciones, pero sin establecer algún tipo de relación entre ellos.

Tabla 6: Representaciones de los participantes en A2 sobre el tiempo de carga y la capacitancia

Representaciones	Invariantes operatorios	
	Teoremas en acción	Conceptos en acción
"Entre más grande sea un condensador, más tiempo se demora en cargarse" (P5).	El tiempo de carga se relaciona directamente con el tamaño del condensador.	Condensador (P1, P5, P9) Intensidad lumínica (P1)
"A mayor capacidad del condensador mayor es la capacidad de almacenamiento, e invierte menos tiempo" (P1).	En un condensador, la capacidad de almacenar carga no se relaciona directamente con el tiempo de descarga.	Carga eléctrica (P9) Corriente (P9) Diferencia de potencial (P9)
"El condensador acumula la carga que viene de la batería permitiendo un menor flujo de la corriente. La batería proporciona la diferencia de potencial. Los cables conducen creando una corriente" (P9).	El condensador acumula la carga que proviene de la batería y disminuye la corriente.	

El 79% restante (P2 a P4, P6 a P8, P10 a P14) expresó a través de algunas relaciones matemáticas cierta comprensión de conceptos como capacitancia, carga eléctrica, voltaje; considerando dichas representaciones como aceptables. Algunas de estas se muestran en la Figura 5.

P1	Capacitancia $C = \frac{Q}{V}$ o $Q = C V$ Ley de Ohm $C = \frac{V}{R}$
P2	$C = \frac{Q}{V} \rightarrow Q = VC$ Ley de Ohm $I = \frac{V}{R}$
P3	Capacitancia $C = \frac{I}{V}$ Ley de Ohm $I = \frac{V}{R}$

Fig. 5: Relaciones matemáticas presentadas por los participantes

De acuerdo con la Figura 5, no es posible hablar de representaciones totalmente pertinentes, al considerar expresiones como la del participante P1, quien expresa de manera inadecuada la ley de Ohm, escribiendo en la ecuación la capacitancia en lugar de la corriente; no obstante, escribe bien la ecuación para la carga almacenada en un condensador. Por su parte, el participante P3 escribe inapropiadamente la ecuación de la carga de un condensador, refiriéndose a la corriente en lugar de la carga (Q) almacenada. En cuanto a las representaciones finales que exteriorizaban los invariantes operatorios concernientes a las relaciones entre tiempo de carga y capacitancia, se caracterizaron por tener un mayor nivel, debido a que trascendieron de la descripción al análisis de la situación. Por ejemplo, el 79% de los participantes (P1 a P3, P6 a P14) se refirió a relaciones matemáticas que pudieron establecer a partir de la recolección de datos con el Arduino; algunas de las representaciones lingüísticas vinculadas a dichas relaciones son mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7: Representaciones de los participantes en A3 y A4 sobre el tiempo de carga y la capacitancia

Representaciones	Invariantes operatorios	
	Teoremas en acción	Conceptos en acción
“La relación que hay entre el tiempo con la carga del condensador, es un tipo de relación directa, mientras mayor es el tiempo mayor es la carga que va a tener el condensador” (P1, P2 y P3).	La relación entre tiempo de carga y capacitancia es directa.	Condensador (P1, P2, P3, P7, P8, P9) Carga (P1, P2, P3) Voltaje (P7, P8, P9)
“Podemos corroborar que tanto en los procesos de carga y descarga del condensador, la carga y la corriente tienen un comportamiento exponencial” (P1, P2 y P3).	La relación entre carga y corriente es exponencial.	
“Para cargarse describe una curva asintótica con el voltaje límite en función del tiempo de carga por lo que la curva será más pronunciada en un condensador más pequeño, y más tenue en un condensador más grande” (P7, P8 y P9).	La relación entre tiempo de carga y voltaje en el condensador es exponencial.	

En las representaciones descritas en la Tabla 7, se observa que los participantes establecieron relaciones acertadas entre variables como tiempo y carga del condensador, mencionando principalmente que es una relación de tipo exponencial, lo cual se acerca a la descripción cualitativa de la expresión matemática presentada en la ecuación 1. Sin embargo, en la primera representación, aún se observa una relación matemática poco apropiada, al considerar como directa la relación entre la carga almacenada y el tiempo. Por otra parte, durante la implementación de la propuesta de enseñanza los participantes tuvieron la oportunidad de registrar en tiempo real, con un SAD como el presentado en la Figura 2, el valor del voltaje en un condensador de $10 \mu\text{F}$ en función del tiempo, durante su proceso de carga y descarga; así como de realizar una gráfica para relacionar estas dos variables a partir de los datos recolectados. En la Figura 6 se presenta la gráfica del tiempo de carga del condensador (V_c , t), elaborada en Excel por uno de los grupos.

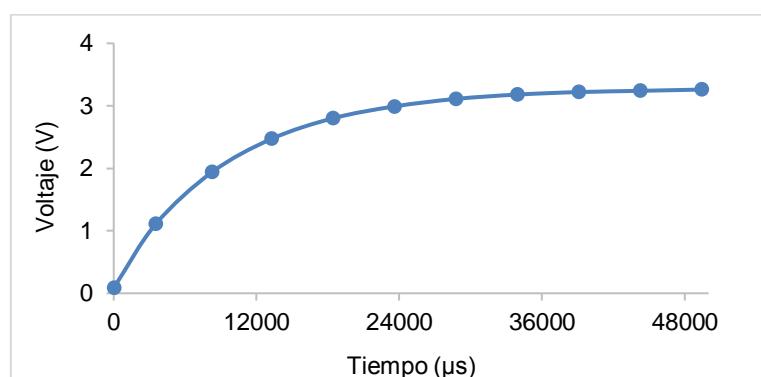


Fig. 6: Carga a través del tiempo (μs) de un condensador de $10 \mu\text{F}$ en serie con una resistencia de $1 \text{ k}\Omega$

Algunos de los participantes (P1 a P9) lograron deducir a partir de la gráfica (V_c , t) de la Figura 6, el comportamiento de la corriente en el circuito y cómo esta se va reduciendo a medida que el condensador se carga; además, en sus interpretaciones involucraron conceptos pertinentes para la situación; como se observa en la Tabla 8. En la Tabla 9 se describen algunas de las interpretaciones de los participantes en relación con la gráfica obtenida durante el proceso de descarga (Figura 7). En las representaciones de tipo lingüístico descritas en la Tabla 7, se pudo identificar que los invariantes operatorios fueron cada vez más pertinentes para enfrentarse a situaciones relacionadas con el concepto de capacitancia; los teoremas y conceptos de la mayoría de los participantes fueron claros y puestos en acción; es decir, se exteriorizaron y relacionaron con las situaciones presentadas.

Tabla 8: Interpretaciones de los participantes sobre la gráfica de carga del condensador

Grupos de participantes	Interpretaciones
P1, P2 y P3	"Como se puede observar la línea tiende a crecer de forma logarítmica, tendiendo a estabilizarse y a tender a una recta en 3,26 voltios"
P4, P5 y P6	"Como se observa en la gráfica, a medida que transcurre el tiempo (eje horizontal), los voltajes aumentan (eje vertical), iniciando desde 0,06 V en el tiempo de 7 μ s, hasta llegar a 3,26 V en el tiempo de 56515 μ s, evidentemente esta gráfica demuestra la carga del condensador. En la gráfica también se puede contemplar que a medida que aumenta el tiempo, los voltajes se mantienen constantes o ascienden de manera más lenta. Esto sucede debido a que el condensador va recibiendo menor intensidad de corriente eléctrica, pues cada vez estará mayormente cargado y al alcanzar la carga máxima la corriente eléctrica en el circuito se hará cero"
P7, P8 y P9	"En las gráficas se puede observar que mientras el condensador se está cargando la gráfica es ascendente y llega a un punto en el que comienza a ser una línea recta, esto nos indica que el condensador ha llegado a un punto máximo donde está cargado completamente, hallándose en ese punto el voltaje máximo (V_0)"

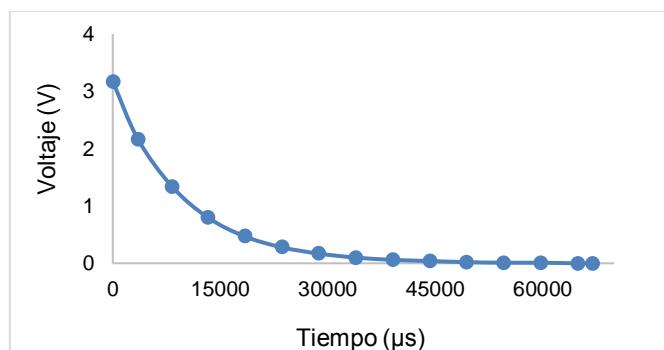
Fig. 7: Descarga a través del tiempo (μ s) de un condensador de 10 μ F en serie con una resistencia de 1 K Ω

Tabla 9: Interpretaciones de los participantes sobre la gráfica de descarga del condensador

Grupos de participantes	Interpretaciones
P1, P2 y P3	"Como se puede observar la línea tiende a decrecer de forma logarítmica tendiendo a estabilizarse y a tender a una recta al llegar 0 voltios"
P4, P5 y P6	"Una vez el condensador está cargado, se procede a la descarga del mismo, en la figura [Figura 7] se representa la descarga del condensador de 10 μ F, en este proceso el condensador le proporciona al circuito la carga que inicialmente adquirió"
P7, P8 y P9	"En la gráfica de descarga del condensador se evidencia que esta va de manera descendente, a medida que este se está descargando la luminosidad del led va disminuyendo con el tiempo llegando a un voltaje cero"
P10, P11 y P12	"Se descarga en un inicio de manera muy veloz y luego lentamente, lo cual se relaciona con la cantidad de carga contenida"

En las interpretaciones de las Figuras 6 y 7 (Tablas 8 y 9), se nota una apropiación del lenguaje matemático y su relación con el fenómeno observado para el 86% de los participantes (P1 a P12). Por ejemplo, en la interpretación de la gráfica de descarga del condensador (Figura 7), P10, P11 y P12 se refieren a un aumento en la velocidad de descarga al inicio de la gráfica y a una disminución gradual que se observa como un decrecimiento en la pendiente de la gráfica. Por lo que esta y las demás representaciones fueron consideradas como pertinentes, aunque se resaltan algunas dificultades en la lectura de las gráficas; por ejemplo, P1, P2 y P3 describen el comportamiento de la gráfica como logarítmica, lo que es inconsistente con la ecuación 1.

El 14% restante (P13 y P14) permaneció en un nivel aceptable, porque en las representaciones utilizadas explicitaban de manera parcial los invariantes operarios y los conceptos construidos; es decir, no lograron adquirir un dominio significativo de los conceptos. Esto se pudo identificar en el ejercicio práctico propuesto por los participantes, en el que P13 y P14 describieron que "así como una corriente eléctrica puede generar un campo magnético, un campo magnético también puede generar una corriente eléctrica, ya que ambos son fenómenos inversos que tienen en común el movimiento de cargas y campos electromagnéticos" (A4); lo que pone en evidencia que para estos participantes sigue siendo confusa la relación entre el campo "eléctrico" y el "magnético", identificada en las representaciones iniciales.

Los anteriores resultados dan cuenta de un acercamiento entre la teoría y los fenómenos, que de acuerdo con Jaime y Escudero (2011), favorece la incorporación de la novedad a través de las situaciones propuestas y la evolución en las representaciones que ayudan a explicitar sus conocimientos; poniendo de manifiesto la potencialidad de la propuesta de enseñanza aquí descrita para favorecer la integración teoría-práctica a partir del trabajo de laboratorio. Por su parte, los Sistemas de Adquisición de Datos implementados en esta propuesta proporcionaron a los futuros maestros de ciencias otras formas de seleccionar y transformar la información necesaria para enfrentarse a una situación de la manera más pertinente posible, trascendiendo el carácter meramente instrumental de la herramienta y favoreciendo la reflexión sobre la forma de construir conceptos a partir de la experimentación, así como el proceso de conceptualización, lo que fue evidenciado en una mayor apropiación de los conceptos al comparar los estados inicial y final de la intervención. Estos resultados son coherentes con los planteados por Chaudry (2020), quien considera que el trabajo con Arduino desde un enfoque práctico facilita el aprendizaje de conceptos de física y sus aplicaciones en la vida cotidiana.

De otro lado, la propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales y haciendo uso de SAD, se constituye en un aporte para la formación de profesores, como una estrategia factible de ser implementada en su futura práctica docente con el propósito de resignificar el trabajo práctico de laboratorio en la enseñanza de la física. Y en este sentido, Enrique y Alzugaray (2013) afirman que cuando los futuros profesores se enfrentan al diseño de un trabajo de laboratorio como investigación, logran apropiarse de diferentes aspectos teóricos, didácticos y motivacionales. Y aunque el interés y la motivación de los participantes no era objeto de valoración del presente estudio, es importante mencionar que estos elementos se vieron altamente favorecidos con el uso del Sistema de Adquisición de Datos basado en Arduino, en concordancia con lo planteado por El-Abd (2017) y Chaudry (2020) en sus investigaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó una propuesta de enseñanza fundamentada en la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, en la que se integró el uso de un Sistema de Adquisición de Datos basado en Arduino para apoyar el trabajo práctico de laboratorio en la enseñanza de la física. La propuesta fue implementada con un grupo de profesores de Ciencias Naturales en formación; y los principales hallazgos dan cuenta de que su implementación, permitió a los participantes 1) obtener una importante cantidad de datos en un tiempo reducido, pudiendo así dedicar un mayor tiempo a la discusión de dificultades conceptuales; 2) adquirir habilidades en el proceso de medición y de construcción de los sistemas físicos, necesarias para la comprensión de conocimiento científico; 3) obtener una mayor precisión en los datos y las gráficas, favoreciendo así la interpretación de éstas; y 4) establecer relaciones entre variables, gracias a una mayor apropiación del lenguaje matemático en el proceso de interpretación de las gráficas obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia y a su convocatoria programática Ciencias Sociales, Humanidades y Artes 2016, por la financiación total del proyecto de investigación que da lugar a este trabajo.

REFERENCIAS

- Abdusselam, M.S., y Karal, H., The effect of using augmented reality and sensing technology to teach magnetism in high school physics, <https://doi.org/10.1080/1475939X.2020.1766550>, *Technology, Pedagogy and Education*, 1-18 (2020).
- Andrés, M.M., Pesa, M., y Moreira, M.A., El trabajo de laboratorio en cursos de física desde la Teoría de los Campos Conceptuales, <https://doi.org/10.1063/1.4915490>, *Ciência y educación* (Bauru), 12(2), 129-142 (2006).
- Arnold, F., De Mallie, I., Florence, L., y Kashinska, D., Method for collecting thermocouple data via secured shell over a wireless local area network in real time, <https://doi.org/10.1063/1.4915490>, *Review of scientific instruments*, 86(035112), 1-5 (2015).
- Bouquet, F., Bobroff, J., Fuchs-Gallezot, M., y Maurines, L., Project-based physics labs using low-cost open-source hardware, <https://doi.org/10.1119/1.4972043>, *American Journal of Physics*, 85(3), 216-222 (2017).
- Caamaño, A., Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: ¿una clasificación útil en los trabajos prácticos?, *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 39(8), ISSN 1133-9837, 19-25 (2004).
- Cardona, M. E., y López, S.Y., Una revisión de literatura sobre el uso de Sistemas de Adquisición de Datos para la enseñanza de la física en la educación básica, media y en la formación de profesores, <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0308>, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39(4), e4404 (2017).
- Chaudry, A.M., Using Arduino Uno microcontroller to create interest in physics, <https://doi.org/10.1119/10.0001841>, *The Physics Teacher*, 58(6), 418-421 (2020).

- Chen, S., Chang, W., Lai, C., y Tsai, C., A comparison of students' approaches to inquiry, conceptual learning, and attitudes in simulation-based and microcomputer-based laboratories, <https://doi.org/10.1002/sce.21126>, *Science Education*, 98(5), 905-935 (2014).
- Chia-Yu, L., Chao-Jung, W., y otros tres autores, Scientific modeling with mobile devices in high school physics labs, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.11.004>, *Computers & Education*, 105, 44-56 (2017).
- Cózar-Gutiérrez, R., Moya-Martínez, M.V., Hernández-Bravo, J.A., y Hernández-Bravo, J.R., Conocimiento y uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) según el estilo de aprendizaje de los futuros maestros, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062016000600010>, *Formación Universitaria*, 9(6), 105-118 (2016).
- De Castro, L.H., Lago, B.L., y Mondaini, F., Damped harmonic oscillator with Arduino, <http://dx.doi.org/doi:%2010.4236/jamp.2015.36075>, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 3(6), 631-636 (2015).
- El-Abd, M., A review of embedded systems education in the Arduino age: lessons learned and future directions, <https://doi.org/10.3991/ijep.v7i2.6845>, *International Journal of Engineering Pedagogy*, 7(2), 79-93 (2017).
- Enrique, C.M., y Alzugaray, G.E., Modelo de enseñanza-aprendizaje para el estudio de la cinemática de un volante inercial usando Tecnologías de la Información y la Comunicación en un Laboratorio de Física, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062013000100002>, *Formación Universitaria*, 6(1), 3-12 (2013).
- Galeriu, C., Letson, C., y Esper, G., An Arduino Investigation of the RC circuit, <https://doi.org/10.1119/1.4917435>, *The Physics Teacher*, 53, 285-288 (2015).
- Gobaw, G.F., y Atagana, H.I., Assessing laboratory skills performance in undergraduate biology students, <https://doi.org/10.5901/ajis.2016.v5n3p113>, *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 5(3), 113-122 (2016).
- Gudyanga, R., y Jita, L.C., Teachers' implementation of laboratory practicals in the South African physical sciences curriculum, *Issues in Educational Research*, 29(3), ISSN 1837-6290, 715-731 (2019).
- Haag, R., Araujo, I., y Veit, E., Por que e como introduzir a aquisição automática de dados no laboratório didático de física?, *Física na escola*, 6(1), ISSN 1983-6430, 69-74 (2005).
- Hepp, P., Prats, M.A., y Holgado, J., Teacher training: technology helping to develop an innovative and reflective professional profile, <https://doi.org/10.7238/rusc.v12i2.2458>, *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 12, 30-43 (2015).
- Instefjord, E.J., y Munthe E., Educating digitally competent teachers: a study of integration of professional digital competence in teacher education, <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.05.016>, *Teaching and Teacher Education*, 67, 37-45 (2017).
- Jaime, E.A., y Escudero, C., El trabajo experimental como posible generador de conocimiento en enseñanza de la física, <https://doi.org/10.5565/rev/ec/v29n3.167>, *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 29(3), 371-380 (2011).
- Kuan, W., Tseng, C., Chen, S., y Wong, C., Development of a computer-assisted instrumentation curriculum for physics Students: using LabVIEW and Arduino Platform, <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9603-y>, *Journal of Science Education and Technology*, 25(3), 427-438 (2016).
- Llanqueo, A., Caballero, M.C., y Moreira, M.A., El aprendizaje del concepto de campo en física: una investigación exploratoria a luz de la teoría de Vergnaud, <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172003000400011>, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25(4), 399-417 (2003).
- Moya, A.A., An Arduino experiment to study charge-voltage relationships in capacitors, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aaea1d>, *Physics Education*, 54(1), 1-4 (2018).
- Munro, M., The complicity of digital technologies in the marketisation of UK higher education: exploring the implications of a critical discourse analysis of thirteen national digital teaching and learning strategies, <https://doi.org/10.1186/s41239-018-0093-2>, *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 15(11), 1-20 (2018).
- Sari, U., Using the Arduino for the experimental determination of a friction coefficient by movement on an inclined plane, <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab0919>, *Physics Education*, 54(3), 1-7 (2019).
- Stake, R.E., *Investigación con estudio de casos*, 5^a Ed., Ediciones Morata, Barcelona, España (2010).
- Tapasco, O.A., y Giraldo, J.A., Estudio comparativo sobre percepción y uso de las TIC entre profesores de universidades públicas y privadas, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062017000200002>, *Formación Universitaria*, 10(2), 3-12 (2017).
- Vergnaud, G., La Théorie des Champs Conceptuels, *Recherches en didactique des mathématiques*, 10(2), ISSN 0246 – 9367, 133-170 (1990).
- Villarreal-Villa, S., García-Guliany, J., Hernández-Palma, H., y Steffens-Sanabria, E., Competencias docentes y transformaciones en la educación en la era digital, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062019000600003>, *Formación Universitaria*, 12(6), 3-14 (2019).



Revista INGENIERÍA UC
ISSN: 1316-6832
revistaing@uc.edu.ve
Universidad de Carabobo
Venezuela

González, Yubiry; Pérez, Jesús; Dunia, Emery
Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con
el uso de multisensores para laboratorios de física universitarios
Revista INGENIERÍA UC, vol. 25, núm. 1, 2018, Enero-Abril
Universidad de Carabobo
Venezuela

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70757668010>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

Design of a system of acquisition and data processing with the use of multisensors for university physics laboratories

Yubiry González^{*,a}, Jesús Pérez^b y Emery Dunia^b

^aPostgrado en instrumentación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

^bDepartamento de Ciencias Básicas, Universidad Politécnica Territorial del Estado Aragua Federico Brito Figueroa, Venezuela.

Abstract.- The design and construction of a data acquisition and data processing system with the use of multisensors for the execution of ten practical laboratory works that covers the curricular contents of basic physics at university level. The proposed system incorporates data acquisition and processing technologies through the use of multi-sensors (ultrasonic position sensor, voltage sensors, light intensity, temperature, mechanical bending and Hall effect) and a PIC 16F870 micro controller, attached To a USB communication interface. The design of automated practical experiences in the acquisition of signals and data processing, showed its effectiveness and versatility for the execution of practical experiences in the laboratories of university physics.

Keywords: data acquisition and processing systems; multisensors; physics laboratories.

Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para laboratorios de física universitarios

Resumen.- Se presenta el diseño y construcción de un sistema de adquisición y procesamiento de datos con el uso de multisensores para la realización de diez trabajos prácticos de laboratorio que abarcan los contenidos curriculares de la física básica a nivel universitario. El sistema propuesto incorpora las tecnologías de adquisición y procesamiento de datos mediante la utilización de multisensores (sensor ultrasónico de posición, sensores de voltaje, de intensidad lumínica, de temperatura, de flexión mecánica y de efecto Hall) y un micro controlador PIC 16F870, unido a una interfaz de comunicación USB. El diseño de las experiencias prácticas automatizadas en la adquisición de señales y procesamiento de datos, mostró su eficacia y versatilidad para la ejecución de experiencias prácticas en los laboratorios de Física universitarios.

Palabras claves: sistemas de adquisición y procesamiento de datos; multisensores; laboratorios de física.

Recibido: mayo 2017

Aceptado: diciembre 2017

1. Introducción

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas se ha caracterizado por el auge de la globalización informática, la automatización y las telecomunicaciones; comúnmente conocidas como Tecnología de Información y Comunicación (TIC), teniendo un amplio impacto, reconocido mundialmente en el área de la ingeniería y la vida cotidiana. Aunado al desarrollo de las TIC se encuentra el empleo

sistemático y extendido de la automatización-control y adquisición-procesamiento de datos, mediante la tecnología de Microcontroladores, también conocidos como controladores de interfaz periférico, o por su acrónimo anglosajón PIC (Peripheral Interface Controller). La incorporación de estos desarrollos tecnológicos dentro del proceso de enseñanza – aprendizaje a nivel universitario trae de la mano, además, notables resultados que permiten acercar a los aprendices, desde la práctica, al uso de estos desarrollos [1].

La incorporación de la automatización y procesamiento de datos con el uso de microcontroladores en los laboratorios universitarios, sirve no solo para hacer más eficiente el procesamiento de datos y la ejecución de los ensayos sino también; y sobre

*Autor para correspondencia:

Correo-e: Yubiry.gonzalez.17@gmail.com (Yubiry González)

todo; para capacitar a los futuros ingenieros en el manejo de las TIC, además de los sistemas automatizados basados en PIC.

Es conocido dentro de los laboratorios de física universitaria que la mayoría de las veces, emplean técnicas de muestreo, tabulación y procesamiento de datos en forma manual y la repetición continua de medidas de una misma situación física particular [2, 3]. El tiempo efectivo de “experimentación” para el estudiante se circumscribe al muestreo estadístico y la lectura visual de instrumentos de medición, soslayando la interpretación, análisis y variación de otros parámetros experimentales, dificultad que puede ser superada con la incorporación de sistemas automatizados y el uso de multisensores.

En los últimos años diversos autores [4, 5, 6, 7] han propuesto iniciativas del empleo de tecnología PIC limitándose a ciertos contenidos de Mecánica Clásica en los Laboratorios de Física Universitaria; siendo menester ampliar la gama de aplicación de tales dispositivos a sistemas multisensores con tecnología PIC que puedan abarcar mas contenidos programáticos en tópicos diversos como Mecánica, Óptica, Electromagnetismo, Termodinámica y Física Moderna.

El objetivo del presente trabajo es presentar el diseño y construcción de un sistema de adquisición y procesamiento de datos empleando tecnología PIC y multisensores analógicos-digitales, a ser implementados en los laboratorios de Física General que cumpla con los siguientes criterios:

- Versatilidad: empleo del mismo sistema de adquisición y procesamiento de datos con diversos sensores para la ejecución de todas las prácticas de laboratorio de física, que incluye contenidos de cinemática, dinámica, hidrostática, electricidad, magnetismo, óptica, calor y temperatura, oscilaciones, ondas y física moderna.
- Robustez: diseño compacto que permite la manipulación por los no expertos. Se presenta el prototipo armado y su configuración permite adicionarle accesorios de forma modular de acuerdo a la aplicación. Evitando

el uso de calibración previa por parte de los usuarios.

- Universalidad: puede acoplarse a cualquier PC, Laptop o Tablet y permite el procesamiento de la información emanada por el sensor usando cualquier software de graficación y manejo de base de datos.
- Economía: construido con materiales de bajo costo y fácil adquisición sin requerir insumos adicionales ni refacciones. El sistema de adquisición de datos y de experimentación es energizado por el ordenador, no requiriendo de fuentes de voltaje adicionales.

En la sección 2 (metodología) se muestra los detalles de su diseño y construcción, seguidamente los trabajos prácticos se especifican en la sección 3 (resultados) y en la sección 4 se discute y concluye sobre la valoración del prototipo.

2. Metodología

El sistema de medición consiste en una maqueta experimental, un sistema de adquisición de datos (Hardware) y un software en Visual Basic para el procesamiento de la información. La maqueta de experimentación pone a prueba la situación física particular, los sensores registran la información requerida y la envían al PIC; el microprocesador crea un archivo .dat y la envía al ordenador a través del puerto USB; el ordenador crea una base de datos por medio de un software en Visual Basic Microsoft® que puede ser leído y procesado por cualquier programa de graficación y cálculo, como Excel®, Origin®, Matlab®, MAPLE® (Figura 1).

2.1. Hardware

El sistema de control y adquisición de datos, consta de un microcontrolador PIC 16F870, siendo uno de los más comerciales, genéricos y económico. Este, presenta varias características que se adaptan a las necesidades del laboratorio. Algunas de ellas es que posee cinco entradas analógicas además de cinco digitales, y un oscilador externo de 20 MHz. El diseño del

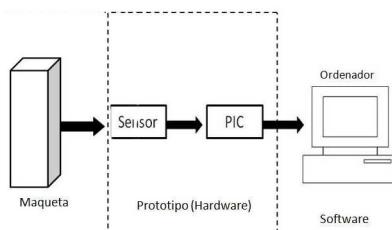


Figura 1: Configuración del sistema de Medición. Incluye la maqueta de experimentación, el prototipo (Hardware) y el programa en Visual Basic (software).

sistema de control que discutiremos más adelante puede, con muy ligeras modificaciones, adaptarse a cualquier otro microprocesador similar al 16F870.

Como característica de diseño se consideró que el PIC solo ejecutará las operaciones básicas de colectar y transmitir los datos de los sensores hacia el computador (en formato .dat), dejando las operaciones de manipulación, cálculos y obtención de gráficas a los programas de usuario (Excel, MatLab, etc). Con ello, se evita tener que reprogramar el PIC cada vez que se redifina la maqueta de experimentación o situación física particular donde quiera emplearse el hardware, y adicionalmente mejora el rendimiento del dispositivo.

La comunicación entre el microprocesador (PIC) y el ordenador (PC) se realiza a través del bus serial universal (USB), en función de su versatilidad de aplicación en las tecnologías actuales de comunicación. Vale recordar que los ordenadores de fabricación posteriores al año 2010 ya no cuentan con puerto serial. Adicionalmente, la comunicación vía USB permite la alimentación del PIC directamente desde la PC sin necesidad de fuentes adicionales, garantizando la sobrevivencia del dispositivo ante fluctuaciones de la red doméstica.

Para la interfaz de comunicación entre el PIC y la PC se utilizó el integrado FT232RL en su configuración estándar (Figura 2). Donde los terminales 1 y 5 del FT232RL reciben y transmiten respectivamente la señal al PIC, y los terminales 15 y 16 se comunican al puerto USB. El capacitor C7, fungue como un capacitor de desacoplo de

componentes alterna de la tensión de alimentación +5V (terminal 19).

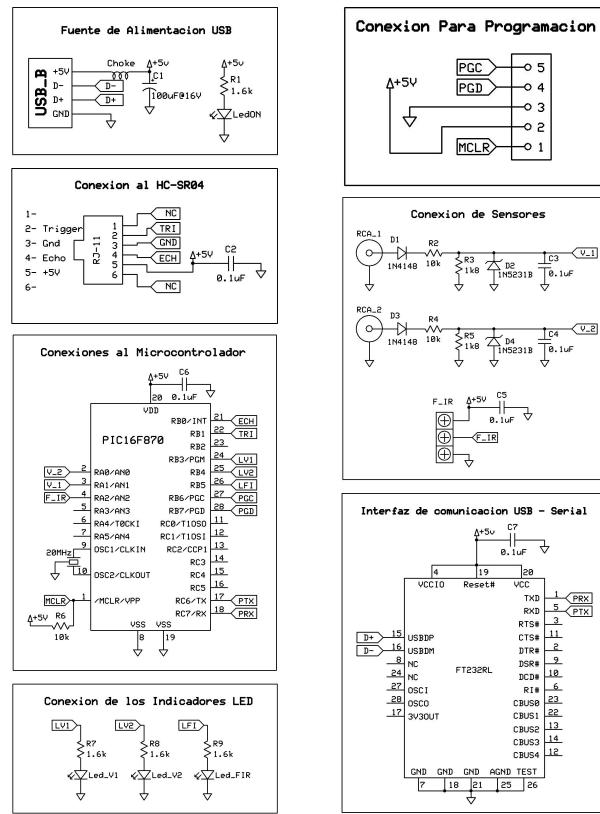


Figura 2: Diagrama en bloque del sistema de control y adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos permite colectar en función del tiempo, simultáneamente las señales enviadas por un sensor ultrasónico de movimiento HC-SR04 (terminales 21 y 22 del PIC), un sensor analógico de voltaje (terminal 4 del PIC) y dos sensores de voltaje digitales (terminales 2 y 3 del PIC). Estas últimas permiten medir tensiones discreta en el rango de 0-255, para ello se emplea un circuito divisor de tensión elemental (Figura 2) provisto de un circuito de protección del PIC ante sobretensiones.

Las entradas de voltaje (V_1 y V_2) al dispositivo se efectúan a través de conectores RCA y cables coaxiales que minimizan el ruido instrumental. Fueron provistos de puntas de prueba para su uso en protoboard, con pinzas para el aterramiento, incorporándolo dentro del dispositivo circuital interno junto al PIC. Como quiera que el sensor analógico de tensión F_IR está alimentado por la

misma fuente del PIC, su conexión no requiere de los componentes de protección y la señal se envía directamente al PIC.

Todo el dispositivo está encapsulado en una caja de proyectos, como se observa en la Figura 3. Los cuatro LED indicadores, corresponden a la señal on-off del equipo, las entradas V_1 y V_2 y a la señal del sensor analógico de tensión F_IR respectivamente, que se encienden al momento de la conexión de los plug correspondientes. Tanto el plug USB, como los plug de los sensores de movimientos y los plug ya referidos son de distinto tipo, con la finalidad didáctica de prever daños al equipo por una mala conexión durante la operatividad.

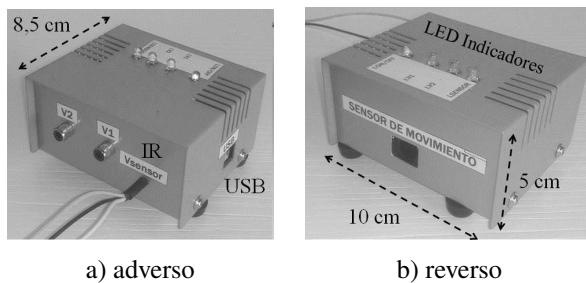


Figura 3: Cajetín y conexiones del Sistema de Control y Adquisición de datos.

2.2. Software

Para conectar y desconectar el sistema de control y adquisición de datos se necesita de un ordenador como se mostró en la Figura 1. Para la activación se creó una interfaz gráfica para que el usuario active o desactive tal sistema y el PIC envía la información de los sensores que luego se transmite directamente al ordenador, en un archivo de texto. Esta interfaz es un programa ejecutable, donde el usuario podrá conectar y desconectar el sistema de control seleccionando el ícono correspondiente, iniciando así la captura de datos de los sensores instalados. Podrá además, seleccionar la velocidad de muestreo, cuyos valores ya están predefinidos (2 s, 1 s, 500 ms, 250 ms y 100 ms) y el puerto COM de comunicación en la PC donde se halla instalado ver Figura 4.

Al desconectar la interfaz el sistema inmediatamente generará un archivo .dat, que contiene



Figura 4: Pantalla de inicio de la interfaz gráfica AAD-LF.

información (dividido en columnas) de las medidas realizadas en unidades de centímetro o volt, según sea el caso, y el intervalo temporal de cada medida. Para visualizar y procesar los datos, el usuario podrá seleccionar cualquier otro software que permita la lectura de este formato (por ejemplo Excel, Matlab entre otros) para la obtención de las curvas, cálculos y gráficas de acuerdo a los objetivos planteados en cada uno de los trabajos prácticos de laboratorio, como se verá en la sección 3.

2.3. Sensores

Se emplean multisensores de respuesta diversa para cada aplicación del dispositivo en situaciones físicas particulares, dependiendo de las Prácticas de Laboratorio a ejecutar, como se discutirá específicamente en la sección 3. Los sensores a emplear son:

- de posición (ultrásónico)
- de tensión eléctrica o voltaje DC
- de intensidad lumínica o fotométrico
- de temperatura (v) de flexión o tensión mecánica
- de efecto Hall.

El sensor ultrásónico (HC-SR04) permite, por un sistema de transmisión y recepción, utilizar dicha señal para captar la distancia. El HC-SR04 registra el lapso entre emisión y recepción del pulso ultrasónico. El PIC contiene un programa que traducirá estos lapsos de retardo como posición del móvil. En sentido estricto hay un error sistemático

debido a que la velocidad del sonido en el aire es finita; lo que acarrea un retardo, del orden del tiempo de respuesta del sensor sónico (ver ecuación (1)).

$$t_s = \frac{2d}{v_{sonido}} \quad (1)$$

Sin embargo, como los desplazamientos (d) considerados en las prácticas de laboratorio a realizar son del orden de las decenas de centímetros; este error es solo del orden de los milisegundos, despreciable cuando los tiempos característicos del sistema (tiempo de recorrido del móvil) son del orden de la decena de segundos. Las posiciones y tiempo son leídas por un programa de usuario como Matlab o similar para elaborar las gráficas requeridas en cada situación física particular de acuerdo al trabajo práctico de laboratorio considerado.

Las entradas de voltaje (V_1 y V_2) permiten medir tensiones discretas en el rango de 0-255. Para realizar el cálculo y obtener los valores de voltaje medidos, debe aplicarse la relación:

$$V = 0,54V + \left[\frac{V_{PC}}{1023} A_i f_s \right] \quad (2)$$

Donde:

V : denota el voltaje aplicado a las entradas V_1 y V_2 (expresada en voltios).

V_{PC} : el voltaje de alimentación, este es entregado por el puerto USB, típicamente es 5,06 V.

A_i : el valor entregado por el equipo al computador, es el equivalente digital del voltaje que se está midiendo (magnitud adimensional).

f_s : es el factor equivalente del divisor de tensión para cada entrada. $6,59 \pm 0,01$ para el canal 1 y $6,55 \pm 0,01$ para el canal 2.

La ecuación (2) resulta de la resolución de la malla de entrada de los sensores RCA_1 y RCA_2 en el circuito de la Figura 2. Obsérvese que las medidas de voltaje mínimamente detectadas están limitadas por la tensión de disparo del diodo de protección 1N4148 por lo que las tensiones medidas serán siempre mayores a 0,54 V.

El sensor fotométrico (S) es un fotoresistor 21K1130 de respuesta lineal en el rango visible, se conecta al cajetín del sistema de control y

adquisición de datos, usando la entrada “Vsens” (Figura 4), a través de entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3). Está alimentado por el PIC por medio de un divisor de tensión constituido por el fotoresistor (R_p) y un resistor R_0 en el orden de $1k\Omega$, en paralelo a la alimentación. En ausencia de luz $R_p \gg R_0$ y la señal que llega al PIC es del orden de 0 voltios, en iluminación, cuando $R_p \ll R_0$ la señal transmitida es $(R_0/R_p) 5$ V.

Se usa como sensor de temperatura un LM35 (transistor marca Texas Instruments), de respuesta lineal en el rango -55 a 150 °C, con exactitud de 0.5 °C a la temperatura ambiente. El LM35 es fundamentalmente un fotómetro infrarrojo, que se conecta directamente al PIC usando la entrada “Vsens” (Figura 4), a través de la entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3) para obtener los cambios de temperatura en función del tiempo.

Como sensor de flexión mecánica se emplea un LDT0-028K, que es piezoelectrónico, donde la flexión crea una tensión dentro del piezopolímero y se generan picos de voltajes del orden de centenares de milivoltios. El microprocesador (PIC) registra las variaciones temporales de voltaje del LDT0-028K, como respuesta a la tensión mecánica o flexión, su alimentación es a través del PIC por medio de la entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3).

El sensor de inducción magnética A3141 consiste en un transistor CMOS, que emplea el efecto Hall, a través de la tensión colector abierto; cuya conexión y alimentación es a través de la entrada analógica de tensión F_IR (Figura 3) sin necesidad de modificar la electrónica ni la programación interna del PIC.

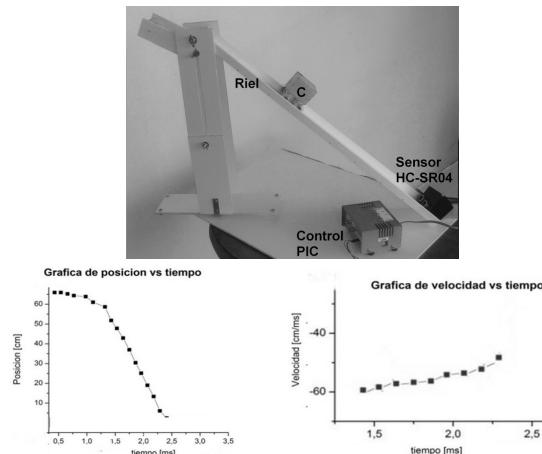
3. Resultados y discusión

Se describen a continuación la implementación del sistema de adquisición y procesamiento de datos en diversas prácticas de laboratorio de los cursos Universitarios de Física General.

3.1. Cinemática (plano inclinado)

Un trabajo práctico de laboratorio, frecuente en casi cualquier laboratorio de física general, consiste en medir la aceleración de un cuerpo que cae sobre

un plano inclinado, bajo la acción de la gravedad. Básicamente, se obtiene la gráfica de posición versus tiempo variando el ángulo de inclinación del plano y la masa del móvil. En las prácticas tradicionales no automatizadas, se obtiene de forma discreta estas gráficas, repitiendo innumerables veces las medidas. Además de monótono, la práctica suele resultar larga en duración y con muchos errores de apreciación. En este caso, el empleo del sistema propuesto (ver Figura 5) permite obtener la gráfica de posición-tiempo en forma automatizada y continua. La mayor actividad de los estudiantes, será discutir y analizar las gráficas obtenidas, según las variables involucradas (masa, ángulo, altura) y no en la repetición de la misma situación física.

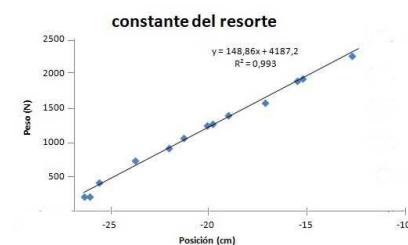
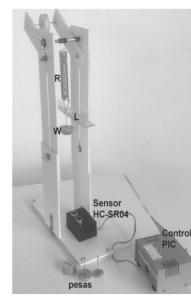


El sensor registra la posición del móvil C en cada instante t y el software genera las gráficas correspondientes.

Figura 5: Diseño experimental de la práctica de cinemática en el plano inclinado.

3.2. Dinámica (Ley de Hooke)

El prototipo puede emplearse para estudiar la Ley de Hooke, en este caso el sensor ultrasónico determina la posición final del sistema. El sensor registra la posición de equilibrio para cada masa. El estudiante varía la masa W para un mismo resorte S de constante de elasticidad k, desconocida. Y a partir de la gráfica de elongación versus masa se determina la constante k. Los estudiantes pueden cambiar el resorte y obtener varios ejemplos para su discusión y comparación. La función de la lámina acrílica (L) es reflejar el eco del sensor y determinar la elongación del resorte para cada pesa.



La experiencia permite la evaluación de la constante de elasticidad del resorte, del orden de $k = 148\ 860$ [N/m] ± 10

Figura 6: Diseño experimental de la práctica de Ley de Hooke.

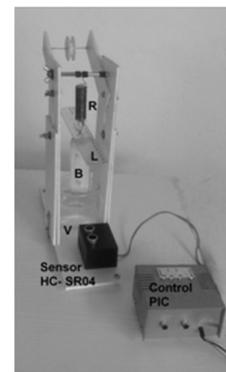


Figura 7: Diseño experimental de la práctica de empuje hidrostático.

3.3. Empuje hidrostático

La configuración experimental usada para la experiencia de Dinámica (Ley de Hooke), puede emplearse para estudiar el principio de Arquímedes y la noción de peso “aparente”. Así, como se muestra en la Figura 7, se sumerge un bloque de madera (B), en un fluido de densidad desconocida (vaso V), puede determinarse el empuje hidrostático, si se conoce la constante del resorte (R), el volumen de la masa sumergida y el desplazamiento del bloque respecto a su posición inicial de equilibrio Δy , medido por el sensor HC-SR04. Análogamente pueden realizarse experimentos donde el estudiante verificará la validez del principio de Arquímedes y probará la dependencia del empuje hidrostático para distintos fluidos.

3.4. Corriente y resistencia

Una práctica de laboratorio usual en los contenidos de corriente y resistencia es la elaboración de la gráfica de corriente versus voltaje para dispositivos óhmicos y no óhmicos (semiconductores). La configuración experimental es la usual (Figura 8), donde el elemento al que se realiza la curva característica (corriente versus voltaje) se denota con Z y R_p es un resistor para medir indirectamente la corriente que circula en Z . Típicamente se realiza esta experiencia para evaluar la curva característica de un diodo semiconductor. Para la realización de la curva característica basta con variar el potenciómetro R_p mientras se adquieren los datos, el dispositivo registra automáticamente las tensiones V_1 y V_2 , con las cuales se obtiene la caída de tensión y la corriente en Z . Adviértase que el registro ocurre en lapso del orden de los milisegundos, por lo cual no es relevante la rapidez en la variación manual del potenciómetro R_p durante la adquisición de los datos. Además se puede cambiar el elemento Z (diodo semiconductor) por un resistor Ohmico (del orden de 20 a 100Ω) para comparar la curva característica con un conductor óhmico.

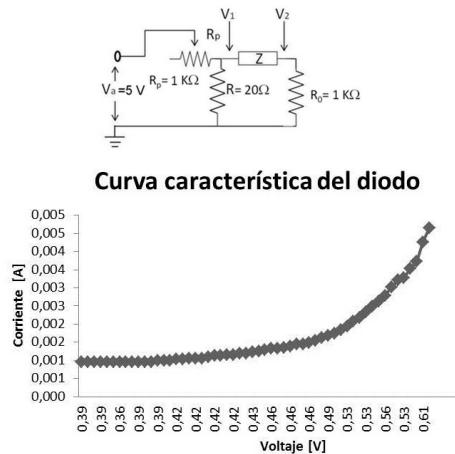


Figura 8: Diseño experimental de la práctica de corriente y resistencia para un diodo 1N4001.

3.5. Capacitancia y circuito RC

Para estudiar la carga y descarga de un capacitor, se empleará un circuito simple RC en serie, constituido por un Resistor de $1k\Omega$ y un capacitor

de 1 mF ; alimentado por una fuente DC de $5V$ como muestra la Figura 9. Los resultados de la carga y descarga del capacitor se muestran en la Figura 10 al registrar las tensiones en V_1 y V_2 para cada milésima de segundo.

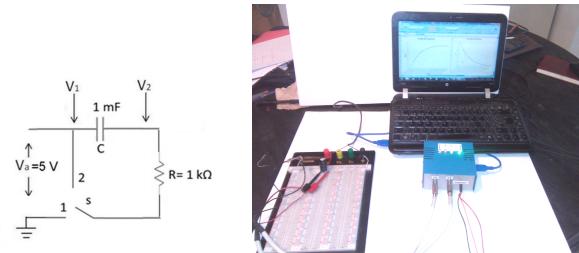


Figura 9: Diseño experimental de la práctica de capacitancia y circuito RC.

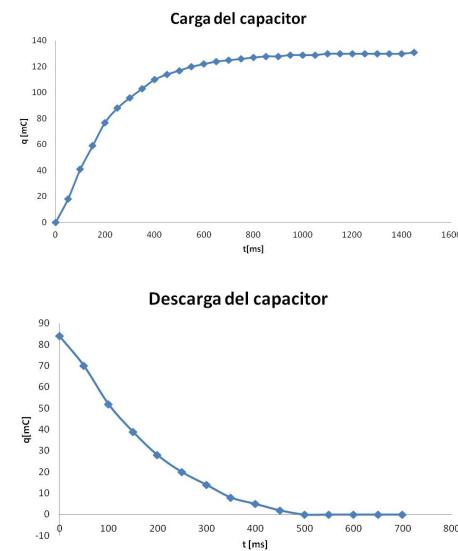


Figura 10: Resultados de la práctica de capacitancia y circuito RC.

3.6. Difracción

El dispositivo también puede usarse para mostrar los experimentos estándar de interferencia y difracción. En la Figura 11 se observa el diseño experimental producido al iluminar con un láser una red de difracción (R). En esta aplicación el sensor ultrasónico (D) guarda la posición del fotómetro (s) cuando se desplaza a lo largo de la pantalla de observación (P), constituida por una lama de vidrio de $0,2 \text{ mm}$ de espesor, permitiendo

obtener automáticamente la curva normalizada de intensidad versus posición del patrón de difracción (Figura 11). A diferencia de las prácticas estándar de difracción de doble rendija, el sistema propuesto permite obtener una gráfica casi continua de posiciones e intensidades.

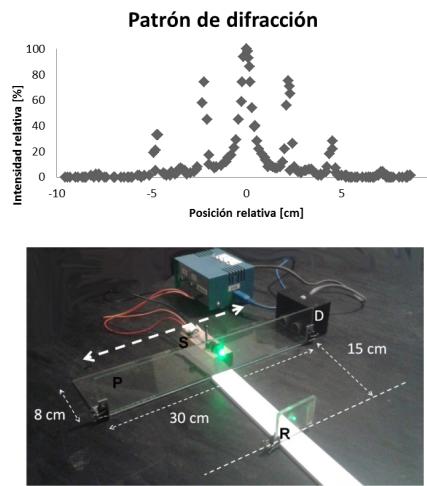


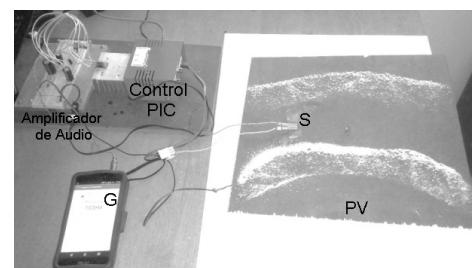
Figura 11: Difracción para una red de 300 líneas/mm iluminada con luz láser verde de 100 mW y longitud de onda 532 nm.

3.7. Resonancia y Patrones de Chladni

En una placa vibrante pueden generarse ondas estacionarias a ciertas frecuencias determinadas (resonancia). Su visualización se suele presentar a través de un medio dispersivo o granular que se acumula en los nodos sobre la placa vibrante. Las figuras generadas por la distribución de material granular sobre las placas se denominan Patrones de Chladni. En esta aplicación se ilustra la generación de tales Patrones siguiendo la configuración propuesta por González [8], tal y como se muestra en la Figura 12, donde además se presenta la curva de resonancia para la placa cuadrada utilizando el sensor de vibración LDT0-028K, que remplazará la sal utilizada como medio dispersivo en la visualización de los nodos y antinodos de la oscilación acústica.

3.8. Cuerpo negro y ley de Stephan–Boltzmann

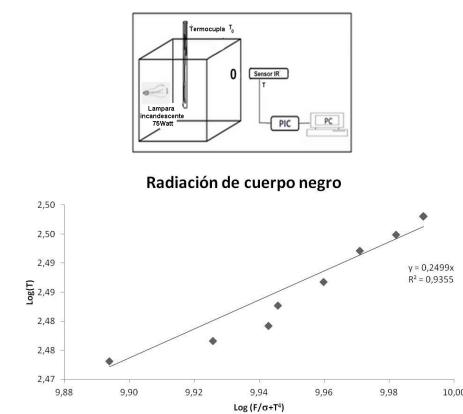
Puede emplearse el sistema para graficar la variación de temperatura en función del tiempo



Se muestran las amplitudes relativas de la oscilación, medida con el sensor de vibración LDT0 028 K (S), para una frecuencia de resonancia de 74 Hz.

Figura 12: Patrones de Chladni.

de un cuerpo negro construido en forma simple, mediante un cubo de madera de 0,3 m de lado, en cuyo interior hay un bombillo incandescente de tungsteno que emite al exterior a través de un pequeño orificio (Figura 13). Para ello se



La pendiente de 1/4 obtenida permite comprobar la ley de Stephan–Boltzmann.

Figura 13: Montaje experimental de la radiación de cuerpo negro.

emplea una termocupla que mide la temperatura termodinámica (T_0) en el interior de la caja enviando la respuesta al PIC a través del sensor de voltaje digital V_1 del dispositivo, simultáneamente el sensor infrarrojo LM35 mide la temperatura de la radiación a través de la emisión del

orificio del cuerpo negro. Empleando el software de graficación se construyen diferentes gráficas, como $\log(T)$ versus t y/o $\log(T)$ versus $\log\left(\frac{F}{\sigma} + T_0^4\right)$ donde F es el cociente entre la potencia del bombillo (75 Watt) y el área de la caja $0,09 \text{ m}^2 \pm 0,001 \text{ cm}^2$. En este último caso la pendiente de la recta obtenida deberá ser del orden de $1/4 = 0,25$; que equivale a la Ley de Stephan-Boltzmann (Figura 13).

3.9. Oscilaciones amortiguadas

Para estudiar las oscilaciones amortiguadas en un sistema masa-resorte vertical, sometido a la aceleración de gravedad, basta con registrar la posición instantánea de la masa oscilante, de acuerdo a la configuración de la Figura 6. El sensor HC-SR04 registra la posición durante la oscilación y podrá obtenerse las gráficas que se muestran en la Figura 14.

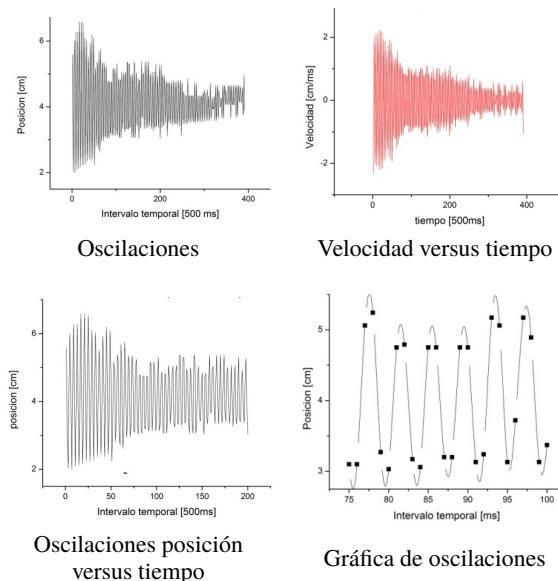


Figura 14: Gráficas del muestreo de 400 datos para el movimiento oscilatorio amortiguado en un lapso de 2 minutos.

3.10. Fuerza magnética y solenoides

Se puede ejemplificar el efecto de la fuerza magnética ejercida por un solenoide, empleando el dispositivo para registrar la inducción magnética de un solenoide de 265 espiras de cobre y con embobinado de longitud $L \approx 0,055\text{m} \pm$

$0,001$ y radio medio $r_{\text{espiras}} \approx 0,63 \text{ cm} \pm 0,01$, que es alimentado por una fuente DC variable (Figura 15). Para ello se conecta un divisor de tensión entre la fuente y el solenoide, con un potenciómetro de $1\text{k}\Omega$ y un resistor de 20 Ohmios . El sensor digital de tensión V_1 registrara la caída de tensión en el resistor mientras el sensor inducción magnética mide las variaciones de voltaje debidas al efecto Hall a través de la entrada F_IR del PIC. La variación de la tensión de alimentación del solenoide, por medio del potenciómetro, permite graficar la tensión Hall en función de la caída de tensión en el solenoide, y con ello la dependencia lineal entre Inducción magnética y corriente en el solenoide.

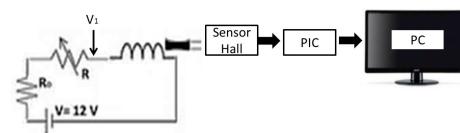


Figura 15: Diseño experimental para ilustrar el campo magnético de un solenoide.

4. Conclusiones

El prototipo elaborado mostró su eficacia como sistema automatizado de adquisición de datos en los trabajos prácticos de laboratorio de física para la enseñanza universitaria, como se mostró en la sección 3. En particular su empleo para las determinaciones de las variaciones temporales de posición, mediante el uso del sensor HC-SR04, mostró ser suficientemente sensible incluso para variaciones tan pequeñas como $0,2 \text{ cm}$ en rango de distancias de 1 a 60 cm de longitud; como se evidenció en las experiencias de cinemática (sección 3.1), Ley de Hooke (sección 3.2) y Empuje Hidrostático (sección 3.3). Se destaca las prestaciones del sensor en cuanto a su empleo en cualquier condición de iluminación y para móviles en trayectorias cortas, del orden de los centímetros, que difícilmente pueden ser alcanzadas con similar prestación por los sensores optoelectrónicos, basados en interruptores de luz infrarrojos.

Así mismo, el uso del dispositivo evidenció su bondad en la colección rápida y eficiente de muchos datos en lapsos de tiempo muy breves, como se mostró en los experimentos de corriente y resistencia (sección 3.4), capacitancia y circuito RC (sección 3.5), Difracción (sección 3.6) y oscilaciones amortiguadas (sección 3.9). Además de su fácil implementación para trabajos prácticos de Laboratorio más elaborados como los correspondientes a Cuerpo negro y ley de Stephan-Boltzmann (sección 3.8) y de resonancia y patrones de Chladni (sección 3.7).

Destaca que el empleo y uso del microcontrolador PIC y el diseño del circuito propuesto (Figura 2) evidenció varias ventajas en su implementación: i) permitió rápida comunicación con la interfaz de usuario al emplear como canal de comunicación el puerto USB en lugar de los puertos serial-paralelo con el ordenador, ii) su versatilidad puesto que los registros de salida del PIC son tipo texto; pudiendo ser leídos y procesados por casi cualquier software de graficación sin requerir la programación interna del PIC y iii) su adaptabilidad y facilidad de implementación para diversas maquetas de experimentación en los laboratorios de física universitaria, al colectar simultáneamente el registro de dos o más sensores de diferentes características estímulo respuestas.

5. Referencias

- [1] Lyle D. Feisel and Albert J. Rosa. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. *Journal of Engineering Education*, 94(1):121–130, 2005.
- [2] Richard T. White. The link between the laboratory and learning. *International Journal of Science Education*, 18(7):761–774, 1996.
- [3] Olga Lucía Castiblanco and Diego Fabián Vizcaíno. La experiencia del laboratorio en la enseñanza de la física. *Revista Educación en Ingeniería*, 3(5):68–74, 2008.
- [4] Juan Carlos Cruz Ardila and Vanesa Espinosa Arroyave. Reflexiones sobre la didáctica en física desde los laboratorios y el uso de las TIC. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (35):105–127, 2012.
- [5] J. C. Cruz Ardila. Importancia de usar tecnología en el desarrollo de prácticas de laboratorio de física mecánica. *Revista Educación en Ingeniería*, (11):1–11, 2011.
- [6] S. Pinto, L. Silva, C. Tenório de Carvalho, and Ciro Jose Egoavil Montero. Pêndulo simples utilizando tecnologia

embarcada de baixo custo aplicado ao ensino da física. *Latin American Journal of Science Education*, 2(1):1–6, 2015.

- [7] Leonardo Bohórquez, Sebastián Martínez, and Hugo Armando Gallego. Diseño y construcción de un prototipo autónomo para la práctica experimental de laboratorios de física. *Scientia et technica*, (52):155–164, 2012.
- [8] Yubiry González. Diseño de prototipos para la enseñanza de la acústica musical a través de patrones de Chladni. *Acta Científica Venezolana*, 66(3):128–133, 2015.



ScienceDirect

Disponible en www.sciencedirect.com



www.elsevier.es/RIAI

Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 13 (2016) 228–237

Sistema integral para el diseño e implementación de control asistido por computadora

David L. Leal^{a,1,*}, Miguel R. Celi^b, Esteban Alvarez^c

^aDepartamento de Formación General y Ciencias Básicas, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

^bDepartamento de Tecnología, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

^cFacultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de adquisición de datos y control altamente interactivo, de bajo costo, y basado en un computador personal. El sistema está constituido por un hardware basado en un microcontrolador y un software basado en estándares abiertos. El software utiliza programación de diagramas de bloques como base para el diseño teórico e implementación de un sistema de control, con la finalidad de hacer que la programación sea sencilla y rápida. Una característica importante del sistema es la capacidad de ejecutar control embebido sin la intervención del computador personal, lo cual permite control en tiempo real. Adicionalmente, tiene capacidad de ampliación para crear un sistema de monitoreo y control distribuido por medio del Bus CAN, como interfaz de comunicación. En este trabajo también se expone la implementación del sistema desarrollado en diferentes plantas.

Palabras Clave:

Entornos de experimentación, Sistemas embebidos o empotrados, Microcontroladores, Sistemas de tiempo real.

1. Introducción

Con los grandes avances en la microelectrónica, la adquisición de datos, y sobre todo por la disminución de los costos, se está volviendo más común el control asistido por computadora de los sistemas industriales y comerciales modernos. El uso de la computadora se extiende desde el diseño, el modelaje, la simulación y la experimentación, hasta llegar a su final implementación. Muchas son las razones que existen para el diseño e implementación de sistemas de control asistido por computadora, entre las que destacan; la naturaleza cíclica del proceso del diseño de control (Uran and Šafarič, 2009), los contenidos visuales que tiene las ideas, conceptos y métodos de control automático (Dormido et al., 2005), el mejoramiento de las interfaces hombre-máquinas (Rimvall and Jobling, 1999), y la facilidad de programación y la versatilidad del software realizado (facilidad de modificación, visualización de resultados, parámetros y variables, comunicación externa, entre otras).

Esta nueva metodología involucra otros campos de competencia en el diseño de sistemas de control, como son la adquisición de datos, la ingeniería de software, la ingeniería de hardware, entre otras. Por consiguiente, existen una heterogeneidad

de herramientas y de métodos, tanto como para el software como para el hardware, que dificultan y prolongan el proceso de diseño (Perko et al., 2011). Generalmente, el ingeniero de control define las leyes de control, que para ser implementadas debe generar un código para su simulación, y posteriormente la conversión del diseño en un código que ejecute todas las operaciones necesarias sobre un computador y hardware de adquisición específico. Rimvall & Jobling (Rimvall and Jobling, 1999), plantean que la generación manual de códigos representó un cuello de botella en los procesos de diseños, hasta la llegada de las herramientas basadas en la autogeneración de código a partir de diagramas de bloques. Este tipo de herramienta disminuye el tiempo de diseño e implementación, primordialmente debido a la reducción de errores generados con la codificación manual. En los últimos años, se han desarrollado varias herramientas comerciales basadas en diagramas de bloques, entre las que destacan Simulab/Simulink de Mathworks, Xcos, SystemBuild™ de Integrated Systems Incorporated, Vissim™, Visual ModelQ y SimApp. Algunas de estas herramientas sirven de interfaces para paquetes de análisis como MATRIXx™ (SystemBuild™), Scilab (Xcos) y MATLAB (Simulink).

Existen diferentes compañías que desarrollan tanto el software como el hardware para la implementación de sistemas de control, como por ejemplo: Mathworks, Quanser, National Instruments, dSpace, Visual Solutions, entre otras. Sin embargo, para el sector académico, estas alternativas pueden resultar cos-

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: dleal@usb.ve (David L. Leal), mirodriguez@usb.ve (Miguel R. Celi), ealvarez@fisica.ciens.ucv.ve (Esteban Alvarez)

tosas, lo cual dificulta su adopción, y adicionalmente, en ciertos casos son diseñados con sistemas no abiertos, lo cual podría impedir su utilización en algunos tipos de plantas.

En los últimos tiempos se han desarrollado hardwares de adquisición basados en sistemas embebidos, como una alternativa de bajo costo. Además, los mismos eliminan las restricciones que se obtienen con el uso de un computador personal para la adquisición de datos y control de alto rendimiento. Microcontroladores, Procesadores de Señales Digitales (DSP, Digital signal processing) y dispositivos compuestos por bloques de lógica programables, mejor conocidos como FPGA por sus siglas en inglés (Field Programmable Gate Array), son ejemplos de hardware embebidos usados en la actualidad para los sistemas de adquisición de datos.

Los microcontroladores fueron uno de los primeros en ser utilizados para esta tarea, y los más populares hoy en día por su bajo costo (Demirtas et al., 2008; Katrancioğlu et al., 2010). Otra razón por la cual se utilizan los microcontroladores en aplicaciones de adquisición de datos y control, es la amplia gama de periféricos incrustados en el mismo chip, facilitando y acelerando el proceso de diseño e implementación de un sistema, ya que disminuye el número total de partes o integrados a ser utilizados. Entre los periféricos destacan: I/O digitales, PWM, timers, comparadores analógicos, conversores A/D y D/A, interfaces de comunicación para USB, Ethernet, CAN, entre otros. Adicionalmente, están disponibles plataformas de hardware libre como Arduino, Pingüino, OLInuXino, Raspberry PI, entre otras, que facilitan aún más la creación de proyectos con microcontroladores.

Lo anteriormente expuesto nos ha motivado a desarrollar un sistema integrado para el diseño e implantación de sistemas de control asistido por computadora, altamente interactivo y de bajo costo. El sistema está constituido por un hardware y un software de adquisición basado en un microcontrolador y en estándares abiertos. El mismo constituye un sistema alternativo que interviene en todos los pasos del diseño e implementación de sistemas de control, incluyendo el modelaje, el propio diseño, la simulación, la experimentación y su final implementación, eliminando así la dependencia de softwares comerciales y el uso de diversas herramientas acopladas. Una de las características más importantes del sistema es la posibilidad de implementar control embebido y control distribuido. Esta capacidad no es excluyente, es decir, el sistema puede ejecutar un control embebido distribuido. Para su utilización no se requiere tener grandes conocimientos en programación ya que el software incluye también mecanismos que permiten realizar el diseño e implementación de un sistema de control en forma gráfica, utilizando diagramas de bloques como base para la creación del código de simulación y final implementación.

En este trabajo se presenta el desarrollo del sistema antes expuesto. El trabajo se encuentra dividido en dos secciones. En la primera se explica el funcionamiento del sistema desarrollado, el cual se divide en el hardware y en el software de adquisición como se indicó anteriormente. En la segunda sección se describe la implementación de diferentes tipos de controles sobre diferentes plantas. Finalmente, las conclusiones relevantes de este trabajo son presentadas.

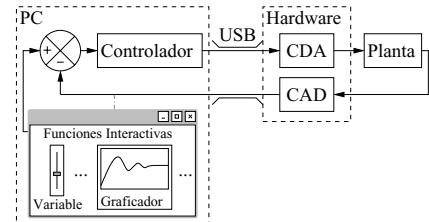


Figura 1: Diagrama de bloques simplificado de sistema en modo compuesto.

2. Descripción del sistema

El sistema está constituido por un hardware embebido y un software para adquisición de datos y control, que utiliza las capacidades de un PC para crear una herramienta que interviene en todos los pasos del diseño e implementación de sistemas de control, incluyendo el modelaje, el diseño, la simulación, la experimentación y su final implementación.

El sistema desarrollado tiene dos modos de operación: el compuesto y el embebido. En el modo compuesto, el lazo de control se cierra por medio de la PC, la cual ejecuta todos los cálculos de realimentación del control. En el modo embebido, tanto los cálculos, como la adquisición y actuación son ejecutadas sobre el hardware embebido, mientras que la PC solo monitorea y envía consignas al proceso. Es importante destacar que en este modo no es indispensable la conexión con la PC, lo que implica que el hardware podría ser desconectado de la misma sin alterar el proceso de ejecución.

2.1. Modo compuesto

En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques simplificado del funcionamiento del sistema en el modo compuesto, ejecutando un control de lazo cerrado simple. Los cálculos de la retroalimentación son llevados a cabo en la PC, quedando el funcionamiento del hardware enmarcado solamente para la adquisición y manipulación de los voltajes de salida.

El sistema permite la implementación de sistemas de control que no requieran un tiempo de muestreo pequeño, teniendo en consideración que tanto las latencias producidas en la comunicación con la PC, en el software y en el sistema operativo en sí, interfieren con el lazo de control. A pesar de esto, el sistema intenta corregir este inconveniente sincronizando el procesamiento de la PC con el reloj del hardware, asegurando así una adquisición en tiempo real. El tiempo mínimo de muestreo es de 5 ms.

2.2. Modo embebido

La figura 2 muestra el diagrama de bloques simplificado del sistema en modo embebido ejecutando el mismo control de lazo cerrado exemplificado en el modo anterior. Observe que ahora los cálculos de la retroalimentación son llevados a cabo en el hardware, y la PC solamente modifica el valor de referencia y monitorea las variables del proceso.

Este mecanismo ayuda a superar la limitación propia de los computadores personales para el manejo o monitoreo de plantas que requieren respuestas veloces, eliminando la necesidad

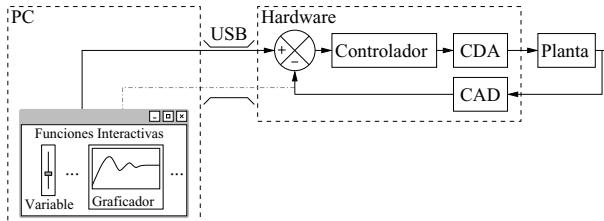


Figura 2: Diagrama de bloques simplificado de sistema en modo embebido.

de incorporar costosas computadoras con capacidad de procesamiento en tiempo real.

El proceso de control embebido se basa en la descarga de un programa diseñado en el software a la memoria de hardware, el cual ejecutará hasta que la PC lo indique o hasta que se reinicie el microcontrolador. El programa puede utilizar las funciones principales del hardware (entradas y salidas, tanto analógicas como digitales y comunicación por medio del bus CAN) y un agregado de funciones de cómputo (por ejemplo: suma, resta, multiplicación, filtrado, control PID, control Borroso, aritmética lógicas, entre otras). Mientras el hardware esté ejecutando el control embebido, la PC puede monitorear, o enviar consignas al mismo. Esta característica permite al usuario final interactuar en el proceso de control.

En este modo, el tiempo de muestreo debe ser seleccionado para que la respuesta del sistema sea estable, normalmente se toma un valor pequeño en función del tiempo de respuesta del sistema a controlar. Además, debe considerarse el retardo entre leer las variables y aplicar la acción de control (tiempo total de ejecución del programa descargado en el hardware), si este retardo es menor a la décima parte del tiempo de muestreo se puede descartar y con esto se asegura la estabilidad cuando se aplica el control. Por ejemplo, para un controlador PID básico, el menor tiempo de muestreo que el hardware puede alcanzar es de 0,32 ms (diez veces el tiempo de retardo). Este ejemplo puede considerarse como el control más simple que el hardware puede implementar, así que la interfaz solo podrá asegurar el control para sistemas con tiempo de respuesta mucho mayor que este tiempo. Por otro lado, el tiempo de monitoreo no necesariamente debe ser el mismo que el tiempo de muestreo al cual se esté ejecutando el control embebido. Debido a las mismas limitaciones explicadas en el modo anterior, el menor tiempo de monitoreo es 5 ms.

2.3. Hardware de adquisición

El hardware embebido se basa en un microcontrolador de la familia PIC32MX, el cual tiene un núcleo MIPS32® M4K® 32-bit. En la figura 3 se muestra el esquema simplificado del hardware de adquisición, donde se observa que el microcontrolador se encarga de la mayor parte de las tareas del hardware, como la conversión analógico digital (CAD), la comunicación con la PC por medio de bus USB, el bus CAN y las entradas/salidas digitales. La conversión digital analógico (CDA) y el acondicionamiento de las señales (CAS, circuito de acondicionamiento de señal) son implementadas por circuitos externos al microcontrolador. El sistema por ende, tiene la capacidad de

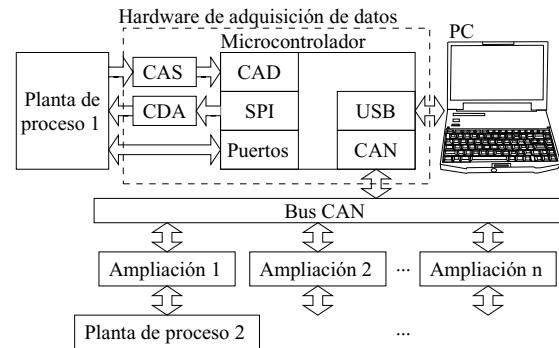


Figura 3: Esquema simplificado del hardware de adquisición y control desarrollado.

interactuar con el mundo externo de dos formas diferentes: la primera es la forma directa, en la cual utiliza una serie de entradas y salidas analógicas con diferentes voltajes de referencia, y también entradas y salidas digitales (ej.: la Planta de proceso 1 de la figura 3). La segunda forma es por medio del Bus CAN que permite ampliar el alcance y las posibilidades de implementar un sistema distribuido de control (ej.: la Planta de proceso 2 de la figura 3).

Las características del hardware son las siguientes:

Entradas analógicas:

- 8 canales de entrada de 10-bit de resolución
- Rango de voltajes: 0-5 Vdc, 0-10 Vdc, ±5 Vdc y ±10 Vdc
- Protección contra sobre voltajes

Salidas analógicas:

- 4 canales de salida de 12-bit de resolución
- Rango de voltajes: 0-5 Vdc, 0-10 Vdc, ±5 Vdc y ±10 Vdc
- Límite de corriente de 20 mA por canal

Entradas/Salidas Digitales:

- 8 canales de entrada TTL
- 8 canales de salida TTL
- Un frecuencímetro

Comunicación con el computador:

- Interfaz: USB 2.0
- Velocidad de transmisión: 12 Mbps/s máx (Full-Speed)

Ampliación del sistema de adquisición:

- Interfaz: CAN Estándar (Versión 2.0A)
- Velocidad: 1 Mbps/s máx

Los rangos de voltaje, tanto para las entradas como para las salidas analógicas, son seleccionados por software, es decir, al momento de la adquisición el usuario puede escoger el rango que deseé para cada entrada o salida por separado.

El costo aproximado para la elaboración del hardware es de \$75.

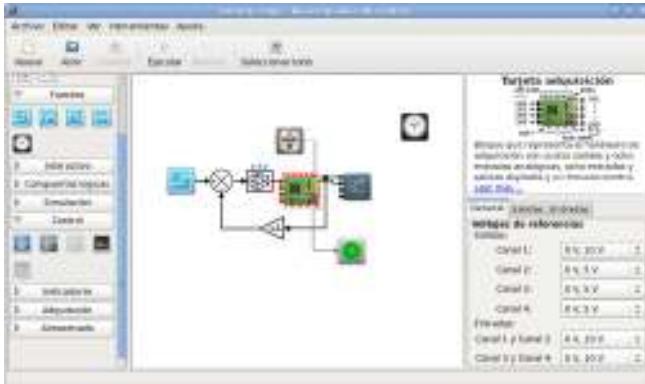


Figura 4: Interfaz del software de adquisición de datos y control desarrollado.

2.4. Software de adquisición

El software multiplataforma elaborado (*ConDP*) está desarrollado bajo librerías pre-escritas de licencia pública, entre las que destacan: GTK+, GLib, LibUSB y libXML. El proceso de diseño e implementación de sistemas de control se realiza de forma gráfica. La programación se basa en la interconexión de objetos en forma de diagramas de bloques. Esta característica permite a un ingeniero de control desarrollar muy rápidamente controladores complicados, ya que tanto el análisis como la simulación del código son automáticamente generados a partir de los diagramas de bloques. Así, se elimina el tiempo que se usaría con la codificación manual y evita la introducción de depuradores de código, reduciendo así los costos finales de producción. Adicionalmente, no se requiere un alto conocimiento en programación para la elaboración de estos controladores.

Para la interacción con el usuario, el software posee una interfaz gráfica formada de un panel de bloques pre-establecidos, un área de dibujo, tablas para la modificación de los atributos de los bloques, zona de ayuda y un menú con elementos básicos y herramientas adicionales (Ver figura 4).

El funcionamiento del software se basa en la construcción de un diagrama de bloques, que será luego simulado o implementado en conjunto con un sistema físico externo. Esta construcción se lleva a cabo sobre un área de dibujo, agregando y conectando bloques. Cada bloque tiene características que pueden ser modificadas por el usuario. Una vez que se termine esta construcción, el usuario puede simular el sistema construido. El proceso de simulación es muy parecido al proceso que ejecuta el programa Simulink (Mosterman et al., 2005).

Cada bloque consiste en una función de entradas, estados y salidas, donde las salidas, a su vez, dependen del tiempo de muestreo, de las entradas y de los estados de la misma función. Con la información del programa creado por el usuario, el software crea primero una lista de las funciones que se ejecutarán, luego enlaza las salidas y entradas correspondientes, y finalmente inicializa y copia los datos de las funciones que los requieran. Una vez realizado esto, el software procede a ejecutar función por función en el orden impuesto hasta finalizar la lista. Este paso de ejecución se denomina paso del lazo de control y continuará hasta que la ejecución sea suspendida, u

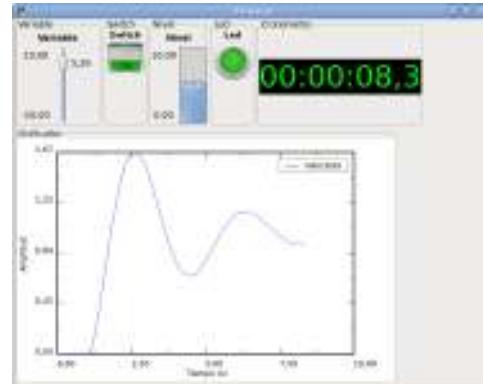


Figura 5: Ventana empotrada con cinco de funciones interactivas.

ocurra un error.

Con este mecanismo es posible simular sistemas físicos, como también crear lazos de ejecución para un monitoreo o control de una planta real. Las características del proceso de ejecución dependen solamente de los bloques que sean incluidos en el proyecto y sus atributos.

Algunos bloques tienen funciones interactivas. Esto quiere decir que intercambian información con el usuario. Unos exponen información de forma gráfica, como por ejemplo el bloque “Graficador”, y otros captan información del usuario para luego introducirla en el proceso de simulación. Cada uno de estas funciones despliega una ventana nueva con las características especiales de su función. Puede suceder que muchos de los bloques utilizados en un proyecto sean interactivos. En este caso se abrirán una cantidad considerable de ventanas, lo cual puede ser engoroso a la hora de trabajar. Una forma de solucionar este problema es empotrar todas estas ventanas en una gran ventana. Esta gran ventana debe ser habilitada antes de iniciar la simulación. En la figura 5 se muestra un ejemplo de la forma de la ventana con una cantidad de funciones interactivas, la primera (superior izquierda) en una variable interactiva que permite modificar un dato mientras se ejecuta el proceso. La segunda en un switch que permite modificar un valor binario. La tercera y cuarta son indicadores de variables diferentes, uno real y el otro binario. Y por último (parte inferior) una gráfica que representa las variables introducidas en la misma en función del tiempo de ejecución.

Para la adquisición de datos o manipulaciones de voltajes de salida, se incluye, dentro del stock de bloques, un bloque que representa el hardware de adquisición. Este bloque posee todas las características virtuales que posee el hardware real.

Adicionalmente, el software posee bloques para la comunicación CAN (SargunaPriya.N et al., 2014), que permiten el envío y la recepción de datos provenientes del bus. Cada bloque del bus CAN tiene un número definido de entradas y salidas. Cada una de ellas puede ser enviada o recibida con un identificador diferente (en el hardware elaborado solo se utilizan identificadores estándares), o todas las entradas o salidas puede encapsularse en una sola trama con un único identificador. La función del bloque es encapsular y des-encapsular tramas entre

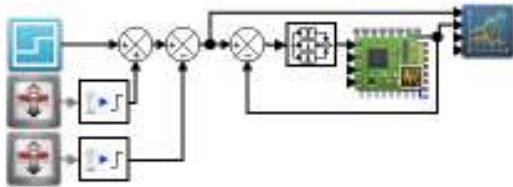


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control de Velocidad de un Motor de corriente continua.

la simulación en el sistema y el bus.

Finalmente, como se mencionó anteriormente, la comunicación entre el hardware y la PC se realiza por medio del bus de datos USB, siendo esta comunicación transparente para el usuario, de forma que el usuario solo se preocupe de solicitar o enviar datos.

3. Diseño e implementación de controladores

3.1. Controlador PID de velocidad

En la teoría clásica de control los controladores PID son los más utilizados. Existen muchos métodos para hallar los parámetros de estos controladores, el más básico es el método de sintonización de primer orden de Ziegler y Nichols (Ogata, 2003), el cual consiste en comparar la salida del proceso con respecto a la respuesta al escalón de un sistema de primer orden.

3.1.1. Descripción y modelado matemático de la planta

El experimento se ejecuta sobre un motor de corriente continua conectado a un juego de engranajes y sensores analógicos de posición y de velocidad integrado todo en un módulo de aprendizaje de sistemas de control (Elettronica Veneta S.p.A., n.d.). En (Leal, 2012) se procedió a caracterizar la planta y los traductores con la finalidad de conseguir una respuesta lineal del sistema con respecto al voltaje aplicado a la entrada. En esta caracterización se aplicó un escalón a la entrada y se ajustó la respuesta a un sistema de primer orden obteniendo la siguiente relación entrada-salida en la variable de Laplace.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{940e^{-0.006s}}{0,072s + 1} \quad (1)$$

Donde $U(s)$ es la entrada del sistema, en voltios. Y la salida $Y(s)$ representa la velocidad del motor en revoluciones por minutos.

3.1.2. Resultado del experimento

Se procedió a montar el experimento conectando el módulo del motor al sistema de adquisición. En este caso usamos una sola salida, la velocidad del motor, y una sola variable a manipular, el voltaje de entrada.

Para la implementación de este controlador se utilizó el sistema de adquisición en modo compuesto, es decir, se ejecuta sobre el computador.

En la interfaz del software de adquisición se procedió a conectar el bloque de adquisición con los diferentes bloques de

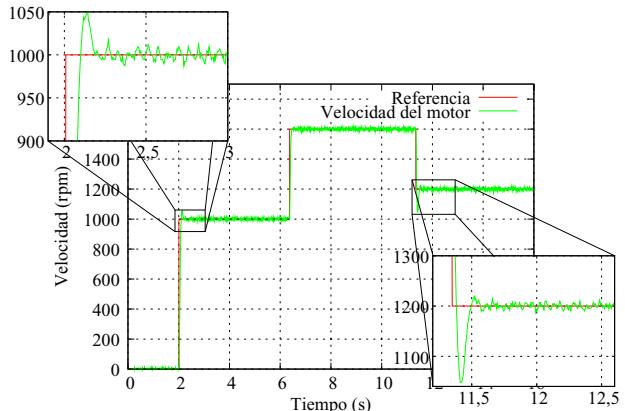


Figura 7: Respuesta de la velocidad con un controlador PID.

funciones (Figura 6). La función PID se basa en un algoritmo implementado en (Ledin, 2004), el cual incluye mecanismos de saturación para los límites del actuador y anti-windup para evitar la saturación en el término integral. Los parámetros del controlador PID encontrados con la sintonización de Ziegler y Nichols son $K_p = 0,012766$, $t_d = 0,003$ y $t_i = 0,012$, parámetros que fueron configurados en el bloque PID.

Además de los bloques de sistemas de adquisición y control, se colocaron bloques sumadores, generadores de escalón, funciones de gráfico y registro de las variables, y pulsadores para cambios manuales de la referencia durante la ejecución del experimento, todos con la finalidad de crear un sistema de control. El experimento estuvo basado en tres cambios de las referencias en el tiempo, el primer cambio fue realizado por el bloque generador de la señal escalón a los 2 segundos de iniciado con una magnitud de 1000 rpm. Aproximadamente a los 6 y 11 segundos se hicieron cambios manuales de la referencia de 1600 rpm y 1200 rpm respectivamente. Con estos cambios se esperaba ver la respuesta asimétrica del sistema, el cual fue linealizado para un punto de operación particular. En la figura 7 se puede observar la respuesta de la planta. La velocidad del motor va desde 0 rpm hasta 1000 rpm, por los valores escogidos de 1000 y 1600 rpm. En la ampliación de las gráficas observamos que los sobrepicos de la señal en aumento y reducción de velocidad son diferentes, pero ninguno sobrepasa de un 10 % de tolerancia. Además, se observa un tiempo de asentamiento menor a 0,1 segundo.

3.2. Controlador con Lógica Borrosa de velocidad

La Lógica Borrosa o Difusa ha tenido una buena aceptación en el campo de la automatización debido a que es una extensión de la lógica tradicional humana, la cual utiliza conceptos subjetivos del pensamiento humano. En vez de realizar cálculos complicados para una acción de control, si el operador conoce el sistema a controlar, realizará cambios relativos a un conjunto de funciones de pertenencia del sistema que el operador genere. De esta manera, el operador podría abrir “un poco” la válvula, o calentar “mucho” el agua, etc. Por lo tanto, la Lógica Borrosa no utilizará valores exactos, sino valores difuminados entre las

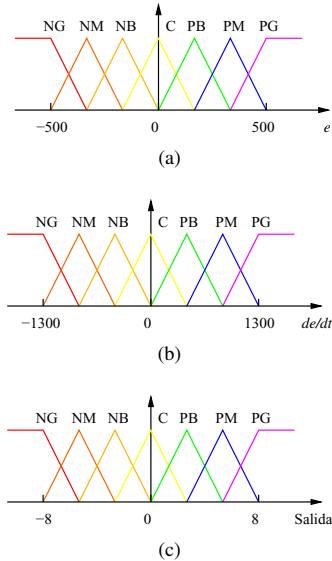


Figura 8: Funciones de pertenencia para el control PD difuso de un motor DC. (a) Función de pertenencia de la variable *error* (e), (b) Función de pertenencia de la variable *cambio de error* (de/dt) y (c) Función de pertenencia de la variable de salida del controlador (*Salida*).

posibles gamas de valores que se necesiten para resolver el problema (Wang, 1997). Una de las ventajas que presenta utilizar un controlador con Lógica Borrosa es la baja complejidad matemática para hallar el controlador, ya que si el sistema posee respuesta no-lineal o es muy complicado, hallar o sintonizar un controlador PID, o por realimentación de estado no es sencillo. Así, el diseño a base por Lógica Borrosa se basa en definir las funciones de pertenencia para la entrada y salida del controlador, las cuales son generadas a partir de los conocimientos subjetivos del operador del sistema. Un control directo borroso permite una interpretación por parte del usuario final y una mejor integración con otras etapas superiores en un marco único (Albertos and Sala, 2004). Ahora bien, si la sencillez para hallar el controlador es una ventaja, lo complicado que puede ser representar todas las funciones de pertenencia si el sistema posee varias entradas y varias salidas es una desventaja. No es que los controladores borrosos estén limitados a sistemas de una entrada y una salida, pero para sistemas de múltiples entradas y salidas puede ser muy difícil su representación. Otra de las mayores desventajas es la desconfianza que existe sobre su funcionamiento, ya que no son soportados por una matemática sólida, que pueda comprobar la robustez del controlador.

3.2.1. Descripción de la planta y el controlador borroso

El sistema a controlar consiste en el motor de corriente continua utilizado en el experimento anterior. En este caso, no se caracterizó el motor, sino que se procedió a montar las funciones de pertenencia a partir del funcionamiento de un controlador PD, es decir, estudiamos las acciones que se deberían tomar en función del valor difuso de la señal de error $e(t)$ y su derivada $de(t)/dt$. Los valores que se tomaron para generar la funciones

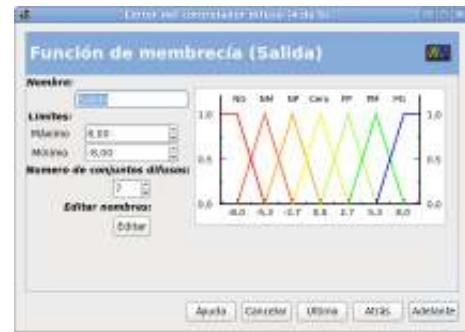


Figura 9: Asistente para la configuración del controlador la función de pertenencia de una de las variables difusas. El usuario puede modificar los límites de universo de discurso, el número de divisiones que componen dicho valor difuso y los nombres de cada función de pertenencia.

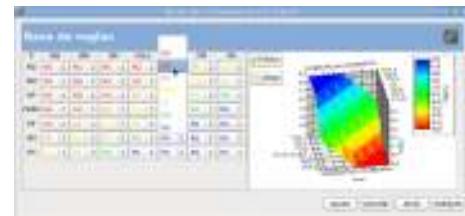


Figura 10: Asistente para la configuración de la base de reglas del controlador difuso. En cada selector aparecen las sub-funciones de la salida del controlador, permitiendo la configuración de todas las reglas posibles. En la parte derecha se muestra la superficie del control.

de pertenencia fueron los siguientes: NG representando negativo grande, NM representando negativo medio, NB representando negativo bajo, C representando cero, PB representando positivo bajo, PM representando positivo medio y PG representando positivo grande. Se utilizaron funciones de membresía continua del tipo Mamdani triangulares, las cuales son fáciles y rápidas de implementar (Ver Figura 8). Su implementación se logra de manera sencilla utilizando las herramientas para configurar las funciones de pertenencias de las variables difusas, figura 9, y las reglas del controlador, figura 10. Estas herramientas permiten de manera gráfica configurar el controlador PD-Borroso fácilmente.

Una vez definidas las funciones de pertenencia, es decir la lógica lingüística, se procede a colocar las reglas para el diseño del controlador PD. Algunos ejemplos de diseño de controladores PID se pueden observar en (Passino and Yurkovich, 1998) y en (Rodríguez et al., 2004). En la tabla 1 se pueden observar las reglas para el controlador PD, donde se decide el tipo de variación de la acción de control, Δu , que se tomará en cada uno de los casos. Así por ejemplo, si la derivada del error es CERO y el error es CERO, Δu tomará el valor de CERO.

El diseño gráfico del controlador consta de los bloques necesarios para hacer cambios al valor de referencia, de un filtro representado con su función de transferencia, que permitirá hallar la derivada del error, el bloque del controlador borroso, un integrador continuo para Δu , el bloque del módulo de adqui-

Tabla 1: Reglas del control difuso para el motor DC.

Δu	Error (e)						
	NG	NM	NB	C	PB	PM	PG
$\frac{de}{dt}$	NG	NG	NG	NG	NM	NB	C
	NM	NG	NG	NM	NB	C	PB
	NB	NG	NG	NM	NB	C	PB
	C	NG	NM	NB	C	PB	PM
	PB	NM	NB	C	PB	PM	PG
	PM	NB	C	PB	PM	PG	PG
PG	C	PB	PM	PG	PG	PG	PG

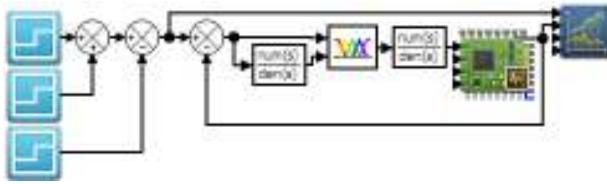


Figura 11: Diagrama de bloques del proyecto para el control de la planta de proceso de velocidad utilizando control de lógica borrosa.

sición, y el bloque de registro de información (Ver figura 11). Debido a que nuestro controlador borroso suministra la variación de la acción de control, el integrador es el encargado de hallar la acción de control u . En el caso del ejemplo de la tabla 1, cuando se haya cambiado la referencia y el error y su derivada sean CERO, Δu resultará también CERO, pero el integrador estará suministrando la suficiente energía al motor para mantener una velocidad continua.

3.2.2. Resultado del experimento

El experimento se diseñó para tener tres cambios del valor de referencia en un periodo de 14 segundos. Estos cambios son los siguientes: 1000, 1600 y 1200 revoluciones por minutos. En la figura 12 se observa la respuesta del sistema controlado. Comparado con el controlador PID del primer experimento podemos observar que la respuesta es más lenta, característica normal de un controlador PD. Este tipo de respuesta tiene como ventaja que el sobre-pico de la señal sea más pequeño. El controlador fue ejecutado sobre el computador usando un periodo

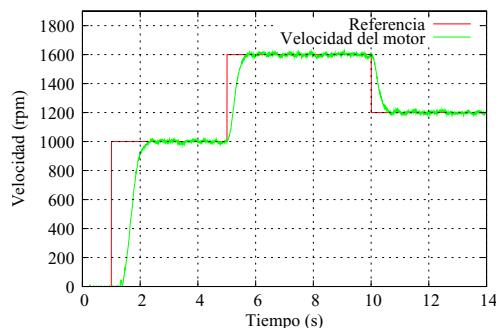


Figura 12: Respuesta de la velocidad con un controlador de lógica borrosa.

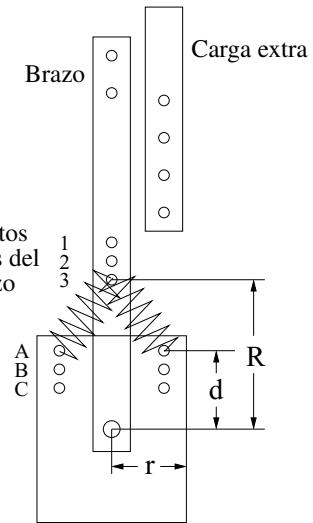


Figura 13: Módulo de la articulación flexible rotatoria.

de muestreo de 5 ms sin que se produjeran pérdidas de datos en el registro, y sin que se produjeran errores en la acciones de control.

3.3. Control por realimentación de estado para una articulación rotatoria flexible

3.3.1. Descripción del experimento

Para mostrar la operatividad del sistema de adquisición en modo embebido, se utilizó la planta piloto de articulación flexible rotatoria. Este módulo educacional es distribuido por Quanser y emula los efectos que ocurren en un brazo mecánico al girar para cambiar de posición, y se puede describir como una articulación flexible compuesta por dos resortes iguales que unen a un rotor y un brazo que representa la carga. La flexibilidad de la articulación se puede variar cambiando la posición de los resortes. Un pequeño brazo puede ser unido al final del brazo principal para cambiar la inercia de la carga (Ver figura 13).

El propósito del experimento es diseñar un controlador que ajuste el brazo a un ángulo deseado con la menor vibración por parte de la articulación. Este ángulo está compuesto por el ángulo de salida del motor (θ) sumado al ángulo correspondiente al movimiento de la articulación flexible, representado éste por el ángulo (α), medido por un potenciómetro engranado en la articulación.

3.3.2. Modelo Matemático

El modelo matemático es derivado a partir de la formulación del Lagrangeano. Este es usado para derivar la energía cinética y potencial del sistema. Las ecuaciones dinámicas son así derivadas y entonces un modelo lineal se obtiene al linearizar en la proximidad del punto de equilibrio (Quanser Inc., 2011). Sustituyendo los parámetros del sistema, se obtiene el siguiente modelo lineal:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (2)$$

$$y = Cx = \theta + \alpha \quad (3)$$

donde

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 767 & -53 & 0 \\ 0 & -1040 & 53 & 0 \end{vmatrix}, \quad B = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 98 \\ -98 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$C = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad x = \begin{vmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{vmatrix}$$

3.3.3. Diseño del controlador

Para este tipo de experimento se optó por diseñar un controlador de realimentación de estado asociado a la ecuación de Riccati (Sontag, 1998):

$$A^T S + S A - (S B + N) R^{-1} (B^T S + N^T) + Q = 0 \quad (5)$$

donde

$$K = R^{-1} (B^T S + N^T) \quad (6)$$

Reescribiéndolo ahora en tiempo continuo, la ley de control de realimentación $u = -Kx$ minimiza la función de costo cuadrática:

$$J(u) = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt, \quad (7)$$

s.t. $\dot{x} = Ax + Bu$

Esta minimización es realizada por la función “lqr” de MATLAB. Para ello utilizaremos los siguientes valores para los pesos en los estados y las entradas:

$$Q = \begin{vmatrix} 1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad R = 10; \quad N = 0 \quad (8)$$

Observe que se penaliza el movimiento elástico de la articulación (α) con 4500. La finalidad es disminuir lo más posible este ángulo. La penalización sobre la posición del motor y su velocidad es la necesaria para encontrar un mejor ajuste con respecto al tiempo de estabilización y el error de estado estacionario. El controlador de realimentación de estado K es el siguiente:

$$K = \begin{vmatrix} 10 & -13,7 & 1,2 & 0,42 \end{vmatrix} \quad (9)$$

La implementación de este controlador se realizó utilizando un equipo comercial y el sistema de adquisición y control integrado. En primer lugar, se utilizaron el módulo “Rotary Flexible Joint” de Quanser junto con el sistema de adquisición proporcionado por la misma compañía. Además se implementó el modelo en Simulink. En la figura 14 podemos observar el diagrama en bloques del sistema de control de la articulación. La tarjeta de adquisición está representada por bloques de entradas y salidas, y después de haber montado el controlador se debe realizar una compilación para poder hacer funcionar el experimento a tiempo real (WinCon). Se utilizó un tiempo de muestreo de 1 ms para ejecutar el control.

Debido a que en nuestro sistema de adquisición y control el hardware y el software están unificados, se procedió a conectar los sensores del módulo “Rotary Flexible Joint” a las entradas analógicas y digital de nuestro hardware. En el software,

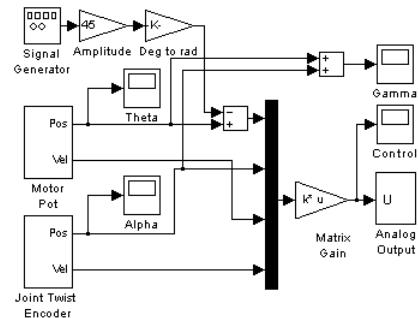


Figura 14: Diagrama en bloques del sistema de control de la articulación bajo Simulink.

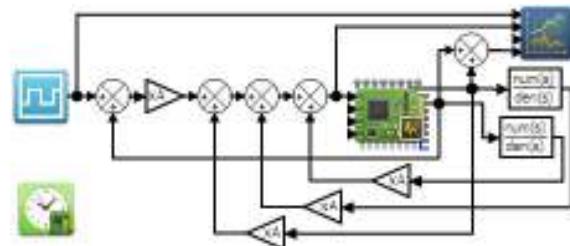


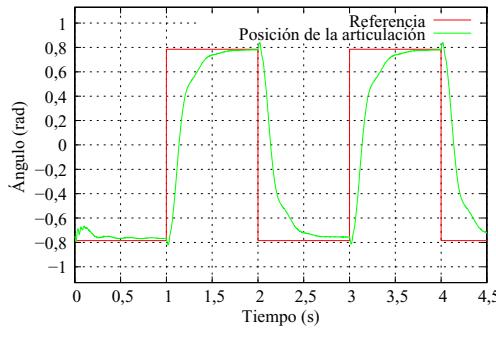
Figura 15: Diagrama en bloques del sistema de control de la articulación bajo el software desarrollado.

se procedió a implementar el diagrama en bloques equivalente, considerando la diferencia de que la tarjeta está representada por un solo bloque de entrada-salidas. Se calcularon las derivadas de las dos variables medidas utilizando filtros representados con sus respectivas funciones de transferencias. Finalmente, se realizaron la realimentación de cada estado (Ver figura 15). A diferencia de los ejemplos anteriores, el sistema de control estará embebido en el sistema de adquisición. Este procedimiento es sencillo, simplemente hay que configurar el diagrama de bloques para operar embebido y verificar que el tiempo del cálculo del control sea mucho menor al periodo de muestreo. Esta configuración se encuentra representada en el bloque verde, con un reloj y una tarjeta como ícono. La información gráfica saldrá del sistema a través del puerto USB con un periodo de muestreo gráfico superior al periodo de muestreo de control, en este caso se ajustó con periodo de muestreo de 1 ms, igual que la plataforma Quanser, y un tiempo de monitoreo de 5 ms.

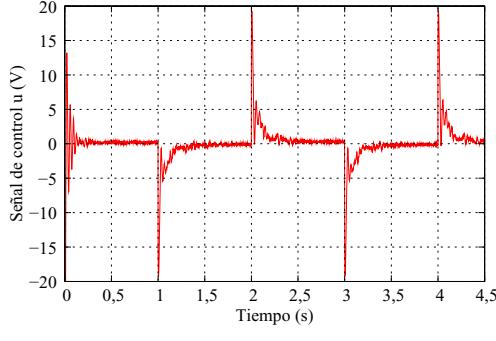
3.3.4. Resultados de los experimentos

En primer lugar, se realizó el experimento utilizando la plataforma Quanser-MATLAB, la respuesta al desempeño del controlador se puede observar en la figura 16. Observe que el controlador es capaz de seguir el valor de referencia, con un tiempo de respuesta menor a medio segundo. El error en estado estacionario es muy pequeño y no hay sobre-pico ni oscilaciones en la respuesta.

En la figura 17 podemos observar las respuestas del sistema para la plataforma presentada en este artículo. Si comparamos las dos respuestas, se puede decir que las dos plataformas son capaces de controlar el sistema, y que el desempeño de cada plataforma es similar. La diferencia que se puede observar en



(a)



(b)

Figura 16: Resultado del experimento realizado con la tarjeta de adquisición de Quanser y Simulink de MATLAB: (a) ángulo del brazo y referencia. (b) señal de control.

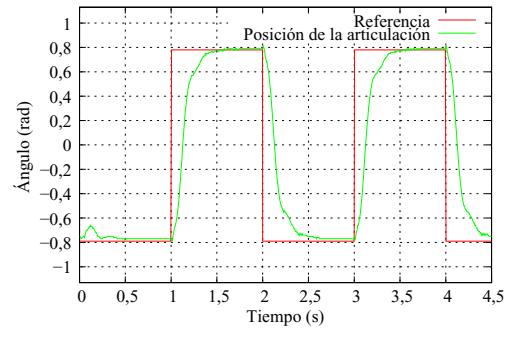
las gráficas es debido al monitoreo, el cual hace un sobremuestreo 5 veces mayor que el tiempo de muestreo, es por ello que los desempeños son similares pero las gráficas presentan diferencias. En la primera parte del experimento podemos observar una pequeña oscilación debido a las condiciones iniciales de los filtros, los cuales no poseen datos correctos para ajustar el controlador.

Se puede observar una respuesta similar al mostrado con la otra plataforma, un tiempo de asentamiento menor de 0,5 segundos. Podemos notar que el error de estado estacionario tiene un valor que siempre es mayor a la referencia. Esto es debido a la cuantificación del sensor de posición, que aunque la señal de control solicita disminuir dicho valor, el motor no es capaz de desplazarse con el mismo. En la figura 17(b) se puede observar que la señal de control intenta ajustar el error de estado estacionario haciendo que la señal oscile con la rapidez del tiempo de muestreo del sistema de adquisición.

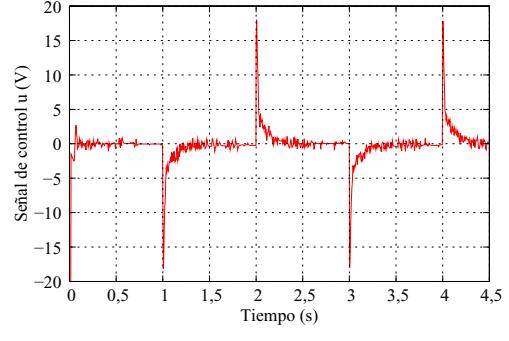
Sin embargo, hay algunas pequeñas diferencias, debidas principalmente a los niveles de cuantificación e implementación computacional de los filtros. Por ejemplo: en cuantificación, la tarjeta de Quanser trabaja con 16 bits, mientras que nuestro sistema trabaja con 10 bits de entrada y 12 bits de salida.

4. Conclusiones

El diseño e implementación del control asistido por computadora ha permitido la creación de sistemas de control a un bajo



(a)



(b)

Figura 17: Resultado del experimento realizado con el Sistema de Adquisición y Control desarrollado: (a) ángulo del brazo y referencia. (b) señal de control.

costo. Esto es cierto, no solo cuando se consideran los costos de los elementos involucrados, sino por la simplificación y aceleración de los procesos de diseño, en los cuales se debe iterar en ciclos de modelaje, simulación y experimentación hasta lograr los resultados esperados. Para lograr incorporar una computadora en este proceso es necesaria la utilización de un sistema de adquisición (hardware y software) como interfaz entre el computador y un sistema físico real. El objetivo central de este trabajo ha sido el desarrollo de una interfaz de bajo costo y de fácil manipulación para la construcción e implementación de un sistema de adquisición de datos y control.

Entre los resultados obtenidos destacan la capacidad de monitoreo y control de diferentes tipos de procesos. Se logró implementar tres tipos de controles sobre plantas con diferentes requerimientos de tiempo de respuesta. Es importante destacar la implementación de un control en tiempo real sobre una articulación rotatoria flexible, la cual fue comparada con herramientas de software y hardware de empresas como Mathworks y Quanser. Los resultados son similares, donde el beneficio es el ahorro en el costo del software y del hardware. Además, las experiencias construidas se realizaron de una forma fácil y rápida con el uso de los diagramas de bloques como base para el diseño y final implementación.

Tomando en cuenta los resultados anteriormente mencionados, podemos concluir que se logró desarrollar un sistema en un ambiente unificado para modelar, diseñar, simular, experimentar e implementar sistemas de control asistido por computadora.

ra. El sistema permite además implementar controles en modo compuesto, en conjunto con una PC, y en modo embebido, donde las acciones de realimentación de control son ejecutadas sobre el hardware de adquisición. El uso de diagramas de bloques facilita la implementación de sistemas de control, ya que no se requiere un alto conocimiento en programación para la elaboración de un proyecto sobre el mismo. Esta característica, además acelera el proceso de desarrollo de lazos de ejecución para diversos objetivos. El sistema de adquisición de datos elaborado constituye un desarrollo de muy bajo costo, en comparación con muchos desarrollos de sistemas similares. Esta afirmación, no solo se fundamenta por considerar los elementos físicos que componen el sistema, sino que además, el mismo elimina la posible dependencia con algún software privativo en todo el proceso de diseño e implementación de sistemas de control. El software permite su expansión para posteriores incorporaciones de nuevos elementos, ya que fue desarrollado bajo Estándares Abiertos.

Por los momentos la interfaz está en la etapa inicial y en la siguiente dirección Web <https://sites.google.com/a/usb.ve/david-leal/home/descargas/condp> se puede obtener un material de apoyo y descargar el software para las plataformas Windows 32-bits y Linux 64-bits, como también el código fuente. La próxima etapa del desarrollo es incluir el diagrama esquemático del circuito para permitir la reproducción del hardware. Con esta etapa se espera que la comunidad pueda mejorar diferentes aplicaciones del sistema desarrollado.

English Summary

Integral computer-aided system for the control design and implementation

Abstract

In this paper, the development of a highly interactive, low-cost, and personal computer based data acquisition and control system is presented. The system includes an embedded microcontroller based hardware and an open-standards software. The software uses block diagram programming as the base for the theoretical design and implementation of the control system, which makes the programming simple and fast. An important feature of this system is that it can execute an embedded control without the personal computer intervention, which facilitates the implementation of real-time control. Additionally, the system has the capacity to expand in order to create a distributed monitoring and control system by using a CAN bus as a communication interface. It is also shown in this paper the implementation of the developed system in different plants.

Keywords:

Experimentation environments, embedded or built-in systems, microcontrollers, real-time systems.

Agradecimientos

Agradecemos al Decanato de Investigación y Desarrollo de la Universidad Simón Bolívar por el soporte económico mediante el proyecto S1-IN-CBTLI-008-10 para realizar esta investigación. A los Laboratorios “C” y “G” adscritos a la Unidad de Laboratorios de la Universidad Simón Bolívar, por facilitar la realización de los experimentos. Y por último, al post-grado de Instrumentación de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela por su apoyo académico e institucional.

Referencias

- Albertos, P., Sala, A., 2004. El control borroso: Una metodología integradora. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 1 (2), 22–31.
- Demirtas, M., Sefa, I., Irmak, E., Colak, I., june 2008. Low-cost and high sensitive microcontroller based data acquisition system for renewable energy sources. In: Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on. pp. 196–199. DOI: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581303
- Dormido, S., Dormido-Canto, S., Dormido, R., Sánchez, J., Duro, N., 2005. The role of interactivity in control learning. *Int. J. Engng Ed.* 21 (6), 1122–1133.
- Elettronica Veneta S.p.A., n.d. Transductor y control de velocidad y posición (Mod. G36A/EV). [Documento en línea] Consultado en junio de 2014 en: <http://www.elettronicaventeta.com/>.
- Katrancıoğlu, S., Savaş, K., Erdal, H., 2010. A modular and low-cost data acquisition card design with multitasking support. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 2, 5266–5270.
- Leal, D., 2012. Diseño y construcción de sistema de adquisición de datos y actuación basado en pc para la enseñanza de diferentes estrategias de control. Trabajo de grado de maestría, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Ledin, J., 2004. Embedded Control Systems in C/C++: An Introduction for Software Developers Using MATLAB. CMP Media LLC, San Francisco.
- Mosterman, P., Prabhu, S., Dowd, A., Glass, J., Erkkinen, T., Kluzza, J., Shenoy, R., 2005. Embedded real-time control via matlab, simulink, and xpc target. In: Hristu-Varsakelis, D., Levine, W. (Eds.), *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*. Birkhäuser, Boston, pp. 419–446.
- Ogata, K., 2003. *Ingierencia de Control Moderna*, 4th Edition. Prentice Hall, Madrid.
- Passino, K., Yurkovich, S., 1998. *Fuzzy Control*. Addison-Wesley.
- Perko, K., Kocik, R., Hamouche, R., Trost, A., 2011. A modelling-based methodology for evaluating the performance of a real-time embedded control system. *Simulation Modelling Practice and Theory* 19 (7), 1594 – 1612.
- Quanser Inc., 2011. *Rotary Flexible Joint Workbook*. [Documento en línea] Consultado en julio de 2014 en: http://eecs.ucf.edu/~abehal/eel4612/lab/General/Flexible_Joint_Workbook.pdf.
- Rimvall, C. M., Jobling, C. P., 1999. Computer-aided control systems design. In: Levine, S. W. (Ed.), *The Control Handbook*. Vol. I. CRC Press, Boca Raton, Ch. 23, pp. 429–442.
- Rodríguez, M., Perdomo, J., Strefezza, M., Colmenare, W., 2004. Control de una extrusora de plástico usando un control pi difuso adaptado con el error de predicción del modelo. *Ciencia e Ingeniería* 25, 61–66.
- SargunaPriya.N, Mani.M, J., Amudha.P, March 2014. Monitoring and control system for industrial parameters using can bus. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* 9 (10), 479–484.
- Sontag, E., 1998. *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*, segunda edición Edition. Springer.
- Uran, S., Šafarić, R., 2009. Web based control teaching. In: Tzafestas, S. (Ed.), *Web-Based Control and Robotics Education*. Vol. 38 of *International Series on INTELLIGENT SYSTEMS, CONTROL AND AUTOMATION: SCIENCE AND ENGINEERING*. Springer, Zographou, Ch. 3, pp. 61–82.
- Wang, L.-X., 1997. *A course in fuzzy systems and control*. Prentice Hall.

Adquisición de datos analógicos con alta precisión usando una Computadora de Placa Única

Fidel Alejandro Rodríguez Corbo, Arturo Hernández González, Jorge Ramírez Beltrán

RESUMEN / ABSTRACT

La utilización de las computadoras de placa única en el campo de la adquisición continua de datos analógicos conduce a la reducción de tiempos de fabricación, fácil implementación y a sistemas más compactos y portables. Como desventajas tienen las pérdidas de datos y errores temporales entre muestras. Sistemas Operativos de Tiempo Real y componentes externos al sistema pueden reducir estos errores, pero tienden a complejizar el proyecto y aumentar su costo. Este trabajo se propone la implementación de un sistema de alta precisión para la adquisición continua de valores analógicos utilizando el BeagleBone Black. La gestión de la frecuencia de muestreo del convertidor analógico digital interno se realiza a través del Subsistema Programable de Tiempo Real, también al interior del BeagleBone Black, garantizando la reducción de componentes externos y una alta precisión temporal. En las pruebas prácticas realizadas se obtuvo un error de 38 ppm de muestras al usar el Subsistema Programable de Tiempo Real mejorando las pérdidas de datos que se producen al gestionar la frecuencia de muestreo desde un temporizador o desde software.

Palabras claves: BeagleBone Black, sistema de adquisición de datos, computadora de placa única

The use of single-board computers in the field of continuous analog data acquisition leads to the reduction of manufacturing times, easy implementation and more compact and portable systems. Disadvantages include data loss and temporary errors between samples. Real-time Operating Systems and components external to the system can reduce these errors, but tend to make the project more complex and increase its cost. This work proposes the implementation of a high precision system for continuous analog data acquisition using the BeagleBone Black. The Programmable Real-Time Subsystem, also inside the BeagleBone Black, guarantees the reduction of external components and a high temporal precision, by imposing the sampling frequency of the internal digital to analog converter. In the practical tests carried out, an error of 38 ppm of samples was obtained when using the Programmable Real-Time Subsystem, improving the data losses that occur when managing the sampling frequency from a timer or from software.

Key words: BeagleBone Black, data acquisition system, single board computer

High precision system for analog data acquisition using a Single Board Computer

1.- INTRODUCCIÓN

Una computadora de placa única (SBC por sus siglas en inglés) es una computadora completamente funcional construida en una placa reducida, con microprocesador, memoria, puertos de entrada-salida y otras funcionalidades adicionales para aplicaciones de propósito general. En la mayoría de los casos estas funcionalidades están incluidas en un chip monolítico llamado Sistema en un Chip (SoC por sus siglas en inglés). Aunque la aparición de las SBC puede remontarse hasta hace más de 30 años, solo hace unos pocos años que se amplió su uso en el campo de la ingeniería eléctrica y automática con el surgimiento de modelos de baja potencia, costo reducido y bien soportados por la comunidad de desarrolladores como la Raspberry Pi y la BeagleBone Black. Este avance tecnológico abrió una puerta para las aplicaciones científicas y en especial al campo de la adquisición continua de datos gracias a su pequeño tamaño, bajo consumo de potencia y facilidades de desarrollo de aplicaciones en corto tiempo [1].

Proyectos académicos que van desde aplicaciones para estudiantes a complejos prototipos en múltiples campos vieron en estas plataformas un lugar donde desarrollarse. La utilización de las SBC en el diseño e implementación de sistemas de adquisición continua facilita la replicación a la vez que disminuye el tiempo de fabricación. Su reducido tamaño se debe principalmente a la utilización de los SoC como núcleo central de la SBC, siendo también su principal característica descriptiva y fuente de sus potencialidades.

Otra de las ventajas de la utilización de las SBC es la gran variedad de lenguajes de programación que son capaces de utilizar. Sus potencialidades para ejecutar un sistema operativo permiten implementaciones en los lenguajes más populares [2]. Uno de los lenguajes más utilizados entre los desarrolladores es el Python, un lenguaje interpretado multiplataforma con gran soporte en las comunidades virtuales. Este lenguaje agiliza la implementación del código gracias a su sintaxis limpia, facilitando el trabajo de desarrolladores no avezados en la programación. La combinación de las SBC como plataforma de desarrollo hardware para la adquisición de datos y el Python como lenguaje de programación suponen un paso importante hacia la creación de sistemas de rápida y fácil implementación.

En la actualidad coexisten un gran número de SBC, en algunos casos con marcadas diferencias entre ellas pero conservando en la mayoría su arquitectura alrededor del SoC. Un proyecto interesante basado en estas plataformas para la adquisición continua de datos utiliza la SBC TS-7250-V2. En este trabajo se enfatizan las ventajas de utilizar una SBC para la creación de registradores de datos, las facilidades de programación de estas plataformas y sus características de bajo consumo de potencia. Aunque se desarrolla un sistema capaz de adquirir y registrar datos desde 20 instrumentos, es de señalar que el costo del prototipo asciende a 1000 dólares, relacionado principalmente al alto precio de esta SBC en comparación con otras disponibles en el mercado [3].

A pesar de la presencia de varias SBC en la actualidad, en el campo de la adquisición continua de datos, la Raspberry Pi y la BeagleBone Black (BBB) suponen las principales exponentes, esencialmente debido a la relación costo-potencialidades así como el soporte por parte de la comunidad de desarrolladores. Proyectos interesantes basados en la adquisición continua de datos analógicos tienen como núcleo central la Raspberry Pi [4-7]. Trabajos realizados para la adquisición de variables acústicas en el fondo marino emplean la Raspberry Pi como núcleo de su plataforma [4]. En esta investigación se utilizan los datos capturados desde un hidrófono hacia la Raspberry Pi y son guardados en la µSD. Una de las principales desventajas del uso del Raspberry Pi para estas funciones es que no trae integrado convertidor analógico-digital, y tampoco un reloj de tiempo real, por lo que para su utilización como registrador de datos analógicos estos periféricos deben ser agregados, aumentando la complejidad del sistema y constituyendo otra fuente de consumo de potencia.

En otro proyecto basado en Raspberry Pi se implementa un registrador de datos para la adquisición de variables en vehículos potenciados por humanos. Nuevamente la utilización de componentes externos a la plataforma es necesario en orden de adquirir las variables analógicas transmitidas por los sensores. Un convertidor analógico-digital fabricado por Microchip Technology MCP3208 es utilizado en conjunto con un reloj de tiempo real externo. Es señalado en esta investigación que las operaciones de escritura y lectura en la memoria µSD pueden detener el lazo de adquisición por un tiempo inaceptable de hasta 600 ms. En este trabajo se evalúa el sistema para un proceso de adquisición durante 10 minutos a un periodo de muestreo de 2 ms utilizando la distribución original del kernel Linux, reportando 990 intervalos mayores a los 2 ms del periodo entre muestras, para una afectación de 3493 ppm de intervalos erróneos. Aunque este problema es evitado utilizando un kernel de tiempo real y escribiendo los valores registrados en la memoria RAM, es reportado por esta investigación que el Raspberry Pi en la configuración utilizada no soporta frecuencias de muestreo por encima de los 500 Hz utilizando los 8 canales simultáneamente [5].

En la automatización de una estación meteorológica Salcedo y Cendrós usan una Raspberry Pi asociada a sensores digitales. En este trabajo se enfatiza la limitación de esta SBC para ser acoplada a sensores analógicos pues impondría el uso de un convertidor analógico-digital externo. Respecto a la frecuencia de muestreo, no se aborda este tema por lo que se supone que los requisitos de la aplicación no son exigentes en este sentido [6]. Una alternativa a la carencia de convertidor analógico-digital se usa en el trabajo de Nikhade donde la adquisición de los datos analógicos la realiza un microcontrolador y este le transmite los datos a la Raspberry Pi por vía inalámbrica. En este caso se usa la SBC en un sistema de adquisición de datos como concentrador de varios nodos de sensores [7].

La BBB, más enfocada en las aplicaciones hardware, contiene 7 entradas analógicas de hasta 200000 muestras/s y un RTC interno [8], convirtiéndola en un sistema más compacto y sencillo para los sistemas de adquisición continua [9-10]. En una investigación conducida hacia el registro de vibraciones mecánicas por principio óptico se implementa la adquisición analógica de la BBB y se usa el lenguaje de programación Python. El sistema desarrollado se destaca por su sencillo diseño y reducción de componentes externos. Aunque no se especifica la frecuencia máxima de adquisición, sin dudas es muy baja pues se gobierna la misma desde el software Python y la salida de los datos es por la consola de Linux [9].

Un proyecto más elaborado plantea la utilización de la BBB en conjunto con una tarjeta de expansión desarrollada por los autores para la adquisición de variables analógicas. En este trabajo se especifica la necesidad de alcanzar altas frecuencias

de muestreo. En la tarjeta de expansión desarrollada se implementan otros 3 convertidores analógico-digitales que trabajarán en conjunto con el convertidor interno de la BBB. En la elección de la BBB ante un microcontrolador seleccionan la primera por las ventajas de tener un sistema operativo Linux completamente funcional. Aunque se especifica como máxima frecuencia de muestreo de la aplicación 1000 muestras/s, los autores reconocen que esta limitación está dada por la sobrecarga de los procesos de usuario en Linux. Esta frecuencia de 1000 muestras/s no es evaluada en el trabajo y los resultados prácticos que se reportan son tomados a una muestra por segundo [2].

En la bibliografía consultada se observa que las SBC presentan deficiencias frente a la estabilidad del disparo de conversión debido a que los sistemas operativos nativos no tienen límites de tiempo para atender los procesos. Esto genera espaciamiento temporal erróneo entre muestras y muchas veces pérdidas de las mismas. La utilización de un sistema de tiempo real (RTOS por sus siglas en inglés) podría disminuir estos errores, pero su instalación en estas plataformas no es sencilla y para usuarios desconocedores implicaría una dificultad extra. Otra deficiencia común a las SBC cuando son programadas en Python es la generación de disparos de conversión utilizando las funciones de la librería Time como lazo de espera. Al ser el Python un lenguaje interpretado y existir varias capas de abstracción hacia el hardware, la función time.sleep() utilizada para este fin no tiene una duración precisa ni estable. Una alternativa a esta función sería la utilización de los temporizadores contenidos en el SoC pero los tiempos de adquisición todavía estarían a cargo del Python, disminuyendo la precisión de estos.

Es recurrente en la bibliografía consultada, la no conciliación de frecuencias altas de muestreo con sistemas de gestión a alto nivel. Esto es debido a que una atención continua al sistema de adquisición puede verse afectado por las demoras de gestión internas o implementadas de un sistema operativo no determinístico. Aunque en algunos casos esta deficiencia es disminuida con la utilización de sistemas operativos de tiempo real, este problema aun constituye una limitante para alcanzar altas frecuencias de muestreo. Este problema resulta en una reducción de la confiabilidad de las SBC en las tareas de adquisición analógica de datos con alta precisión.

Una característica distintiva de la BBB es la inclusión en el SoC de un subsistema llamado Programmable Real-Time Unit Subsystem (PRUSS) basado en dos procesadores RISC de 32 bits independientes al procesador central y con acceso a todos los periféricos del SoC [11]. La utilización de estos procesadores para establecer la frecuencia de muestreo y atención al convertidor analógico-digital permitirían a la BBB adquirir señales analógicas a una frecuencia constante y evitar pérdida de datos. En este artículo se presenta una solución para disciplinar el convertidor analógico-digital en la BBB utilizando el PRUSS y obtener un sistema de adquisición de señales analógicas de alta precisión gestionado desde una aplicación Python. Una caracterización rigurosa del sistema de muestreo permite validar a la BBB como un sistema de adquisición de datos analógicos de alta precisión y confiabilidad, a la vez de permitir la gestión desde un lenguaje de alto nivel como el Python y liberar al procesador ARM de las principales cargas asociadas a la adquisición de los datos.

2.- BEAGLEBONE BLACK

La BBB pertenece a la gama de las BeagleBoards, hasta la actualidad la más vendida y popular de la serie. Catalogada como una SBC fuertemente enfocada al desarrollo de hardware, sus principales características son: procesador ARM Sitara AM3358 1GHz, 512MB de RAM, Ethernet, SPI, I2C, 69 GPIO, 4 temporizadores, 7 entradas analógicas y otras de uso más específico [12].

El convertidor analógico-digital (ADC) o el Touchscreen Controller como es identificado en el Manual de Referencia Técnica del AM335x, es un ADC de 12 bits y 8 canales de propósito general con soporte opcional para paneles táctiles resistivos [8]. De los 8 canales analógicos en el procesador, solo 7 se encuentran accesibles a través de los puertos de expansión de la BBB ubicados en el puerto P9 mostrado en la figura 1. En esta figura se muestran encerrados en rojo los pinos relacionados con el ADC. Como el rango de estas entradas analógicas es de 0 a 1,8 V, junto a la tierra analógica está disponible una tensión de alimentación de 1,8V.

Es tarea del sistema de adquisición de datos ejecutar el inicio de conversión y establecer la frecuencia de muestreo. Para garantizar la estabilidad del muestreo y que no existan pérdidas de datos, el disparo de conversión así como la atención a los datos guardados en la FIFO del ADC serán atendidos por el PRUSS, un subsistema al interior del SoC AM3358 mostrado en la figura 2.

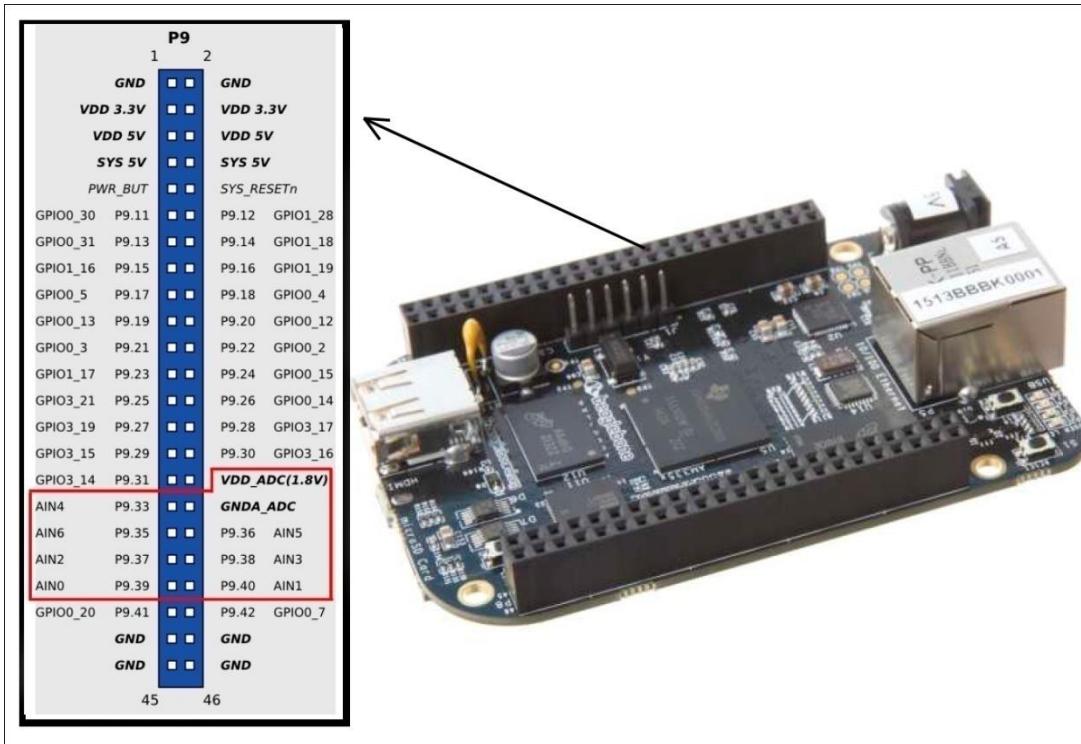


Figura 1

Entradas analógicas en la BBB situadas en el puerto P9 junto a la referencia y alimentación para este fin.

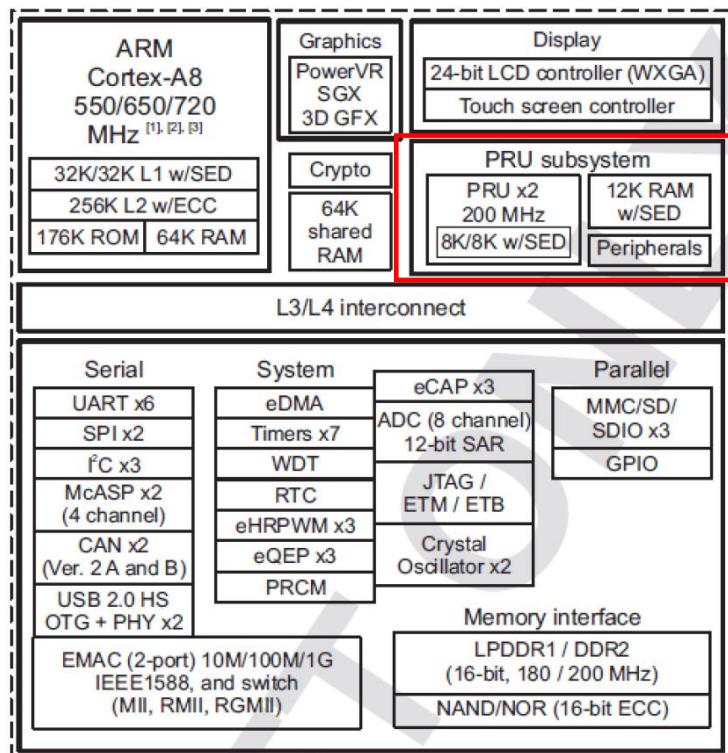


Figura 2

Arquitectura interna del AM335X [8].

El subsistema consta de dos procesadores RISC de 32 bits a una frecuencia de 200 MHz llamados Programable Real-Time Unit (PRU0 y PRU1). Los PRUs funcionan de forma independiente uno del otro y tienen acceso a todos los periféricos del SoC. Por diseño tienen un rápido acceso al resto de los sistemas así como atención a eventos externos con una estabilidad de tiempo base en el orden de las 50 ppm y una resolución temporal de 5ns. Estas cualidades convierten al PRUSS en una buena opción para sistemas críticos en tiempo. El sistema diseñado utiliza esta cualidad para disciplinar el ADC interno de la BBB.

El código de los PRUs está escrito en lenguaje ensamblador garantizando un mayor control sobre los tiempos de disparo y lazos de espera entre muestras. Esta ventaja supondría un problema para usuarios no adiestrados en ensamblador y las funciones de los PRUs dificultando el uso del sistema por parte de usuarios generales y desarrolladores no expertos. En respuesta a esta desventaja se creó un sistema de alto nivel que gestionará las aplicaciones implementadas en los PRUs que se distribuirían como un firmware para la adquisición de señales analógicas.

La BBB en su revisión C tiene como sistema operativo Linux Debian y trae de forma nativa un intérprete de Python. Las facilidades de uso de este lenguaje lo hacen una buena opción para gestionar la aplicación principal del sistema de adquisición. Para establecer comunicación con los PRUs se utilizó la librería PyPRUSS disponible en internet, que se encarga de escribir los programas en espacio de ejecución en cada uno de los PRUs y establecer comunicación con ellos a través de interrupciones. Un esquema del funcionamiento es mostrado en la figura 3.

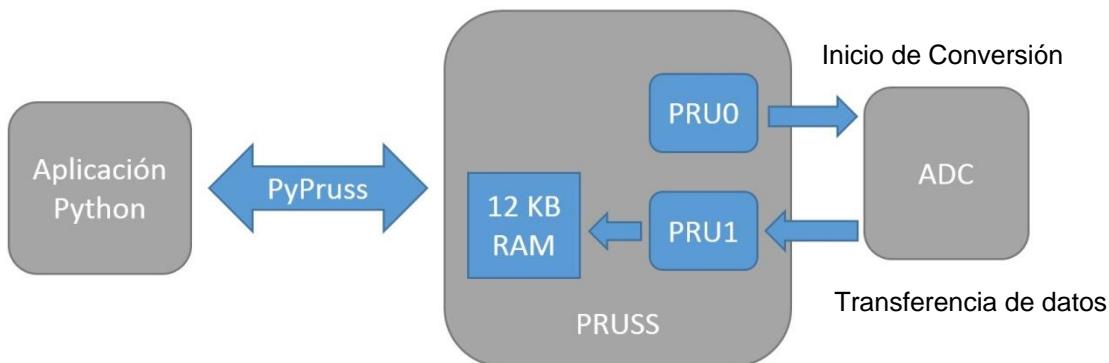


Figura 3
Esquema de funcionamiento.

Una vez que los programas compilados son descargados en los PRUs utilizando la librería PyPruss, el PRU0 se encarga de inicializar el ADC y comenzar la conversión. A la vez, el PRU1 está a la espera de los datos en la FIFO del ADC para ser salvados. Ambos PRUs comparten una RAM interna de 12Kb para el intercambio y almacenamiento de datos la que es usada por el PRU1 para almacenar de manera temporal las muestras extraídas del ADC. Cada valor leído del convertidor es un número binario de 32 bits, por lo que el espacio para muestras se ve reducido a 3000 muestras [11]. En dependencia de la frecuencia de muestreo y los canales utilizados este espacio se puede llenar en un tiempo relativamente rápido. Es tarea del programa principal salvar estos datos hacia archivos en memoria no volátil. El PyPruss permite establecer comunicación con los PRUs a través de interrupciones por lo que la aplicación principal recibirá una interrupción cíclica de parte del PRU1 cada vez que la memoria interna se encuentre lista para ser salvada. Esto garantiza la continuidad de los datos adquiridos y que no ocurran pérdidas de los mismos.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la validación del sistema se capturó la cantidad de muestras adquiridas durante un tiempo impuesto por un sistema GPS. Se tomó como referencia de tiempo la salida de pulso por segundo (PPS, por sus siglas en inglés) del Adafruit Ultimate GPSV3, con resolución de 10 ns y muy alta sensibilidad [13]. Esta señal es emitida como un pulso en alto por 50ms en cada inicio de segundo permitiendo contar de manera precisa la cantidad de segundos transcurridos al contar la

cantidad de pulsos. El número de muestras adquiridas durante un tiempo base es comparada con la cantidad de muestras esperadas en el mismo tiempo transcurrido a una frecuencia constante, mostrando los errores durante la adquisición.

Como método comparativo también fue evaluada la función `time.sleep()` del Python y un temporizador interno del SoC para realizar el disparo de conversión del ADC. El temporizador utilizado está embebido en el periférico de Ethernet industrial que también forma parte del PRUSS [11].

La señal PPS es pasada al PRU1 a través de su puerto de expansión ubicado en el P9.26 mostrado en la figura 4, el cual es reflejado en su registro de entrada R31 en el bit 16 [11]. Este bit es encuestado por el PRU1 contando la cantidad de segundos transcurridos en cada transición del mismo.

17	A16	I2C1_SCL	pr1_uart0_txd		
18	B16	I2C1_SDA	pr1_uart0_rxd		
19	D17	I2C2_SCL	pr1_uart0_rts_n		
20	D18	I2C2_SDA	pr1_uart0_cts_n		
21	B17	UART2_TXD	pr1_uart0_rts_n		
22	A17	UART2_RXD	pr1_uart0_cts_n		
P9	24	D15	UART1_TXD	pr1_uart0_txd	pr1_pru0_pru_r31_16 (Input)
25	A14	GPIO3_21*	pr1_pru0_pru_r30_5 (Output)	pr1_pru0_pru_r31_5 (Input)	
26	D16	UART1_RXD	pr1_uart0_rxd	pr1_pru1_pru_r31_16	
27	C13	GPIO3_19	pr1_pru0_pru_r30_7 (Output)	pr1_pru0_pru_r31_7 (Input)	
28	C12	SPI1_CS0	eCAP2_in_PWM2_out	pr1_pru0_pru_r30_3 (Output)	pr1_pru0_pru_r31_3 (Input)
29	B13	SPI1_D0	pr1_pru0_pru_r30_1 (Output)	pr1_pru0_pru_r31_1 (Input)	
30	D12	SPI1_D1	pr1_pru0_pru_r30_2 (Output)	pr1_pru0_pru_r31_2 (Input)	
31	A13	SPI1_SCLK	pr1_pru0_pru_r30_0 (Output)	pr1_pru0_pru_r31_0 (Input)	

Figura 4
Entrada de la señal PPS al PRU1 a través del puerto de expansión [12].

Tres frecuencias de muestreo fueron evaluadas: 400 muestras/s, 1000 muestras/s y 5000 muestras/s. Fueron elegidas en el marco de futuros proyectos para la utilización de las señales adquiridas en la detección de eventos en tuberías de agua. En el caso de 400 m/s y 1000 m/s para la detección y localización de rupturas súbitas y fugas de fondo en tuberías plásticas, y en el caso de 5000 m/s para la detección de fugas de fondo en tuberías metálicas usando métodos vibro-acústicos. Cada prueba fue repetida 10 veces, permitiendo evaluar también la desviación típica de cada captura y por lo tanto la estabilidad del muestreo.

La figura 5, presenta la cantidad de muestras adquiridas a 400 muestras/s en un rango de tiempo de un minuto y cinco minutos.

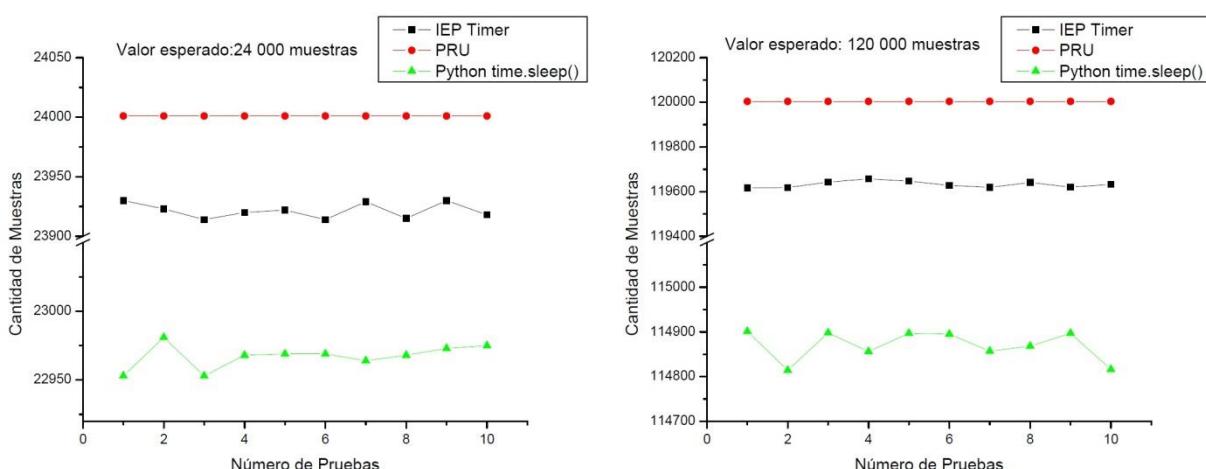


Figura 5
Muestras obtenidas a 400 muestras/s durante 1 minuto (izquierda) y 5 minutos (derecha).

El valor esperado durante un minuto a 400 muestras/s es de 24000 muestras adquiridas. El valor medio de las muestras adquiridas utilizando la función de Python `time.sleep()` es de 22969, asumiendo una pérdida promedio de 1031 muestras en un minuto de adquisición y una desviación típica de 8,86 muestras. A esta misma frecuencia de adquisición, pero durante 5 minutos, la cantidad de muestras esperadas es de 120000. El valor promedio de la adquisición para esta función de Python fue de 114880, suponiendo una pérdida de 5120 muestras y una desviación típica de 33,75 muestras.

La utilización de un temporizador aumenta notablemente la precisión de la adquisición. Para un valor esperado de 24000 muestras en un minuto, el disparo por el temporizador alcanza un valor medio de 23921, para una pérdida promedio de 79 muestras y una desviación típica de 6,43 muestras. Para 5 minutos de adquisición se alcanzan valores medios de 119630, para una pérdida promedio de 370 muestras y una desviación típica de 14,14 muestras.

Realizando el disparo de conversión con los PRUs se obtiene para un minuto de adquisición 24001 muestras para un error promedio de una muestra y desviación típica de 0 muestras. En 5 minutos un valor de 120004 muestras, para un error promedio de 4 muestras y desviación típica nuevamente de 0 muestras.

Las figuras 6 y 7 muestran los valores adquiridos a 1000 muestras/s y 5000 muestras/s respectivamente durante uno y cinco minutos de adquisición. La tabla 1 muestra un resumen de los valores registrados en todas las pruebas.

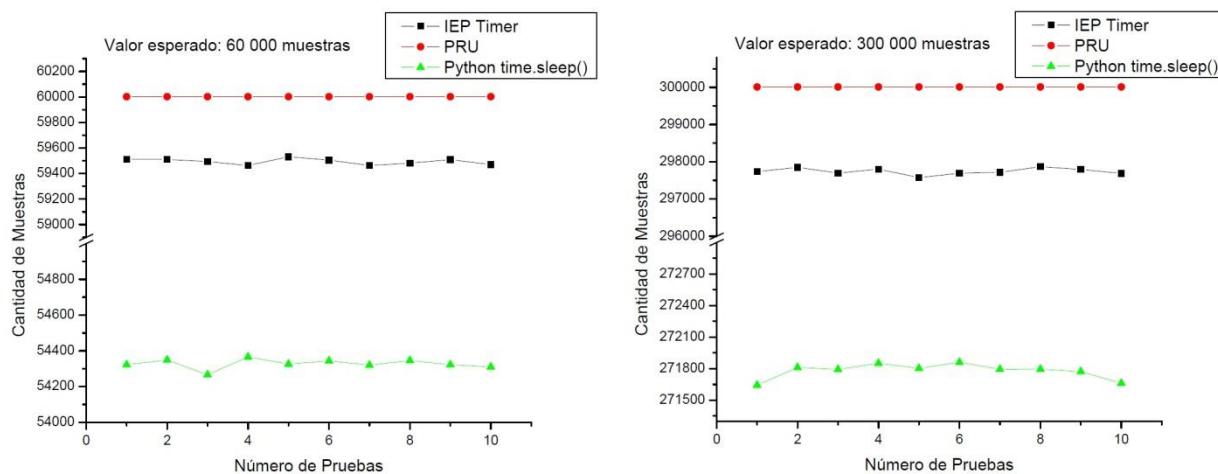


Figura 6
Muestras obtenidas a 1000 muestras/s durante 1 minuto (izquierda) y 5 minutos (derecha).

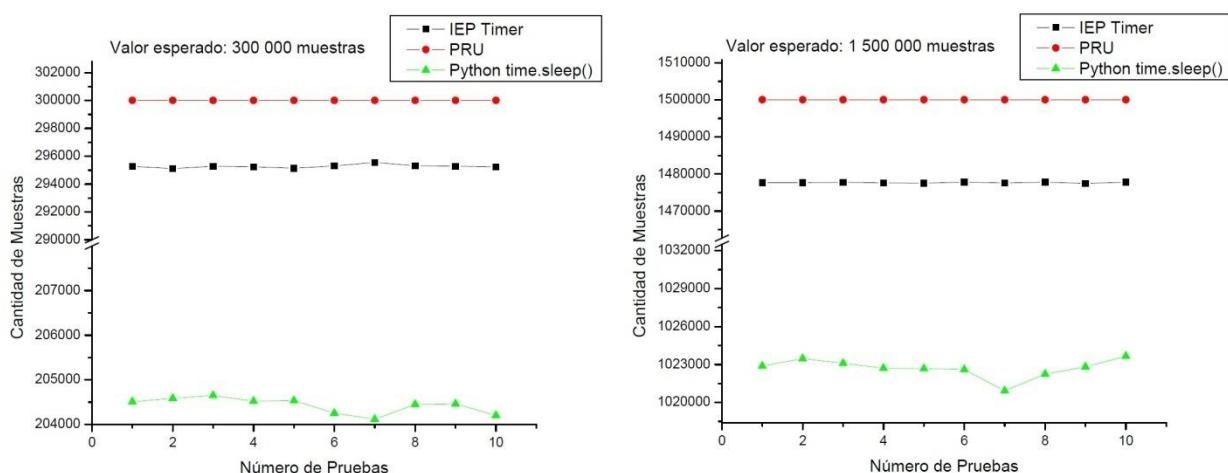


Figura 7
Muestras obtenidas a 5000 muestras/s durante 1 minuto (izquierda) y 5 minutos (derecha).

En los resultados presentados en la Tabla 1 se observa como el error absoluto promedio se incrementa notablemente al elevarse la frecuencia de muestreo. En el caso de la función time.sleep() a 400 muestras/s se tiene una pérdida promedio del 4,3 % de las muestras adquiridas, esta cifra asciende al 31,84 % de las muestras cuando se encuentra en régimen de 5000 muestras/s. En el caso del temporizador, al no depender de las demoras del sistema operativo, los resultados son superiores a los alcanzados con la función de Python. Para 400 muestras/s se tiene una pérdida promedio del 0,33 % ascendiendo a 1,57 % de las muestras a 5000 muestras/s. Ambos casos presentan una desviación típica con tendencia a ascender con la frecuencia de adquisición. En el caso del sistema implementado para el disparo de conversión utilizando los PRUs, el error absoluto promedio se mantiene en el rango de 0,3 a 0,4 %. La dispersión es en todos los casos de 0 muestras, demostrándose la estabilidad de la frecuencia de muestreo impuesta por el PRU0. El error absoluto generado por el PRU es probablemente debido al reloj interno del subsistema, el cual es un Lazo de Seguimiento de Fase (PLL por sus siglas en inglés), que usa como base de tiempo el oscilador a cristal de la BBB.

Tabla 1
Valores registrados en las pruebas realizadas.

	Frecuencia de Muestreo [muestras/s]	Python time.sleep()		Temporizador		PRUSS	
		1 min	5min	1 min	5min	1 min	5min
Error absoluto promedio [muestras] y error relativo entre paréntesis [% de las muestras esperadas]	400	1031 (4,3%)	5120 (4,3%)	79 (0,33%)	370 (0,31%)	1 (0,004%)	4 (0,003%)
	1000	5676 (9,46%)	28210 (9,4%)	537 (0,89%)	2275 (0,76%)	2 (0,003%)	11 (0,004%)
	5000	95520 (31,84%)	477200 (31,81%)	4720 (1,57%)	22345 (1,49%)	11 (0,004%)	58 (0,004%)
Desviación Típica [muestras]	400	8,86	33,75	6,43	14,14	0	0
	1000	27,42	72	23,48	88,2	0	0
	5000	176,85	752,65	120,57	116,57	0	0
Error relativo promedio para peor caso de 5000 muestras/s y 5min [partes por millón (ppm) de las muestras esperadas]		318133 ppm		14897 ppm		38 ppm	

Al final de la tabla se muestra el error relativo promedio, esta vez expresado como partes por millón de muestras referidas a las muestras esperadas. En el caso del time.sleep() y el temporizador este valor es calculado para la máxima frecuencia de muestreo durante 5 minutos por ser el peor caso, debido a la inestabilidad del error absoluto frente a la frecuencia de adquisición. En el caso de la utilización del PRU y su alta estabilidad en el error absoluto en todas las frecuencias de muestreo empleadas, este valor aproximado de 38 ppm puede ser utilizado para estimar su precisión en todos los rangos de frecuencia de muestreo.

4.- CONCLUSIONES

Con la utilización del Subsistema Programable de Tiempo Real de la BeagleBone Black para gestionar el disparo de conversión del ADC y la atención a los datos generados por la adquisición se logra reducir las pérdidas de datos a 38 ppm. Si se usara un temporizador, la pérdida de datos promedio sería de 14897 ppm y con un disparo por software sería de 318133 ppm.

La desviación típica de los valores adquiridos con el uso del PRUSS es de cero muestras, lo que garantiza una alta estabilidad en la frecuencia de muestreo.

El sistema diseñado es capaz de garantizar una adquisición de señales analógicas con una alta precisión en la BeagleBone Black, evitando aumentar los costos por la utilización de componentes externos. La solución aquí implementada permite

obtener una gran estabilidad temporal de muestreo usando lenguajes de alto nivel como el Python en una computadoras de placa única.

La gestión de la adquisición desde el PRUSS permite que el procesador principal de la BBB solamente maneje el movimiento de los datos adquiridos desde la RAM hacia la micro SD. Este proceso no afecta la atención a la adquisición de los datos.

REFERENCIAS

1. Piri D, Nagy TG, Barta V, Bán D, Bánya L, Bór J, et al. Universal Raspberry Pi based data logger developed for the NCK Geophysical Observatory–IAGA division 5. Observatory, instruments, surveys and analyses. *Geomatikai Közlemények*. 2015;18(1):93-94.
2. Laros JH, Pokorny P, DeBonis D., PowerInsight. A commodity power measurement capability. IEEE International Green Computing Conference Proceedings. Arlington; USA; 2013.p. 27-29.
3. Dickhut PJ, Hathaway KK. Custom data logger for real-time remote field data collections. Army Engineer Research and Development Center Vicksburg United States, 2017.
4. Caldas-Morgan M, Alvarez-Rosario A, Padovese LR. An autonomous underwater recorder based on a single board computer. *PloS One*. 2015;10(6):1-18.
5. Ambro M. Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human powered vehicles. *Measurement*. 2017;100:7-18.
6. Salcedo M, Cendrós J. Uso del minicomputador de bajo costo “Raspberry Pi” en estaciones meteorológicas. *Télématique*. 2016;15(1):62-84.
7. Nikhade SG. Wireless sensor network system using Raspberry Pi and ZigBee for environmental monitoring applications. IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). Chennai; India; 2015.p. 6-8.
8. Texas Instruments. AM335x ARM Cortex-A8 Microprocessors (MPUs) Technical Reference Manual; 2011.
9. Jolly AR, Chakravarthi MK. A standalone data logger for fiber optic vibration measurement system using Beaglebone. IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). Coimbatore; India; 2016.p. 519-522.
10. Lütjohann DS, Jung N, Bräse S. Open source life science automation: design of experiments and data acquisition via “dial-a-device”. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2015;144:100-7.
11. Texas Instruments. AM335x PRU-ICSS Reference Guide; 2013.
12. Coley G. Beaglebone Black system reference manual. Texas Instruments, Dallas. 2013.
13. Pokhsrryan D. Fast Data Acquisition system based on NI-myRIO board with GPS time stamping capabilities for atmospheric electricity research. 5th International TEPA Symposium Thunderstorm and Elementary Particle Acceleration. Aragatsotn; Armenia; 2015.p. 23-27.

AUTORES

Fidel Alejandro Rodríguez Corbo. Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Profesor Instructor de la Universidad de La Habana, La Habana, Cuba. fidel.rodriguez@flacso.uh.cu. Como aspirante al título de máster en Diseño de Sistemas Electrónicos investiga en sistemas embebidos, instrumentación y acondicionamiento de señales.

Arturo Hernández González. Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Profesor Instructor de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba. Investiga en instrumentación, sensores inteligentes y acondicionamiento de señales.

Jorge Ramírez Beltrán. Ingeniero Electrónico. Investigador Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba. Investiga en instrumentación y detección y localización de eventos en tuberías.



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN

Enrique Guzmán y Valle

Alma Máter del Magisterio Nacional

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

Escuela Profesional de Electrónica y Telecomunicaciones



MONOGRAFÍA

Modelamiento clásico en el espacio de estado de los sistemas de control en tiempo discreto

Examen de Suficiencia Profesional Res. N° 0374-2018- D- FATEC

Presentada por:

Llosa Rodriguez, Paul Michael

Para optar al Título Profesional de Licenciado en Educación
Especialidad: Electrónica e Informática

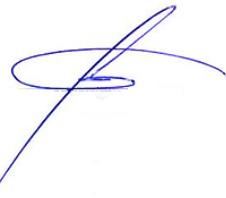
Lima, Perú

2018

MONOGRAFÍA

Modelamiento clásico en el espacio de estado de los sistemas de control en tiempo discreto

Designación de Jurado Resolución N° 0374-2018-D-FATEC



Dr. Soria Cuellar, Fidel Tadeo
Presidente



Dr. Niño Cueva, Danés Carlos Enrique
Secretario



Dra. Asencios Trujillo, Lucia
Vocal

Línea de Investigación: Tecnología y soportes educativos.

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a mi familia, que me apoyó en todo momento durante el transcurso del mismo, dándome su apoyo incondicional en todo momento. A todo ellos muchas gracias.

Índice de contenidos

Portada	i
Hoja de firmas de jurado	ii
Dedicatoria.....	iii
Índice de contenidos	iv
Lista de tablas	viii
Lista de figuras	ix
Introducción.....	xii
Capítulo I. Fundamentos de los sistemas de control	14
1.1 Definición	14
1.2 Evolución de los sistemas de control.....	15
1.3 Conceptos básicos.....	21
1.3.1 Planta.....	22
1.3.2 Proceso.....	22
1.3.3 Sistema	23
1.3.4 Entrada	23
1.3.5 Salida.....	24
1.4 Tipos de sistemas de control.....	24
1.4.1 Lazo abierto.....	25
1.4.2 Lazo cerrado.....	25
1.4.3 Servomecanismo	26
1.5 Modelos matemáticos de sistemas físicos	26
1.5.1 Sistemas mecánicos	27
1.5.1.1 Sistemas mecánicos de traslación	28

1.5.1.2 Sistemas mecánicos en paralelo	28
1.5.1.3 Sistemas mecánicos en serie	29
1.5.1.4 Sistemas mecánicos de rotación.....	30
1.5.2 Sistemas eléctricos	32
1.5.2.1 Sistemas eléctricos en serie.....	34
1.5.2.2 Sistemas eléctricos en paralelo	35
Capítulo II. Modelamiento en el espacio de estado.....	37
2.1 Definición	37
2.2 Base matemática	37
2.3 Conceptos básicos.....	38
2.3.1 Estado.....	38
2.3.2 Variables de estado	38
2.3.3 Vector de estado.....	39
2.3.4 Espacio de estado	39
2.3.5 Ecuaciones en el espacio de estado.....	39
2.4 Limitaciones del control convencional.....	42
2.5 Sistemas dinámicos.....	43
2.5.1 Clasificación	43
2.5.1.1 Continuos	43
2.5.1.2 Discretos	44
2.5.1.3 Autónomos	44
2.5.1.4 No autónomos	45
2.5.1.5 Invariantes con respecto al tiempo.....	45
2.5.1.6 Variantes con el tiempo.....	45
2.5.1.7 Lineales	45

2.5.1.8 No lineales	46
2.6 Formas canónicas	46
2.6.1 Canónica controlable.....	47
2.6.2 Canónica observable	48
2.6.3 Canónica diagonal.....	49
2.6.4 Canónica de Jordán	49
2.7 Solución de las ecuaciones	50
Capítulo III. Proyecto: Simulación de un sismómetro mecánico en 3D	51
3.1 Fundamento	51
3.2 Objetivos.....	51
3.2.1 Objetivo general	51
3.2.2 Objetivos específicos	52
3.3 Diseño del proyecto	52
3.3.1 Sismógrafos.....	52
3.3.1.1 Sismogramas	53
3.3.1.2 Descripción del sismograma	54
3.3.1.3 Colocación de los sismógrafos.....	54
3.3.2 Sistemas y programas	55
3.3.2.1 Matlab	55
3.3.2.2 Simulink.....	56
3.3.2.3 VRealm builder.....	58
3.3.3 Modelo matemático del sismómetro	59
3.4 Planificación	62
3.4.1 Actividades planificadas en el tiempo	62
3.4.2 Relación de costos.....	63

3.4.3 Costo total	63
3.5 Elaboración del proyecto	64
3.6 Prueba del proyecto	70
3.7 Evaluación del proyecto	70
Aplicación didáctica	71
Síntesis.....	86
Apreciación crítica y sugerencias	88
Referencias	90

Lista de tablas

Tabla 1. Actividades de planificación	63
Tabla 2. Costo del proyecto	63
Tabla 3. Funciones de la S-function	81

Lista de figuras

Figura 1. Puerta de Herón.....	16
Figura 2. Reloj de Ktsibios	16
Figura 3. Clepsydra de Platón.....	17
Figura 4. Lámpara de Philón	17
Figura 5. Molino de viento URSS	18
Figura 6. Horno de coque	19
Figura 7. Máquina de vapor.....	19
Figura 8. Inventos de Torres Quevedo	20
Figura 9. Sistemas modernos de control.....	21
Figura 10. Planta de biogás.....	22
Figura 11. Proceso industrial	23
Figura 12. Sistema de suministro eléctrico.....	23
Figura 13. Entrada de señal al sistema	24
Figura 14. Salida de señal del sistema.....	24
Figura 15. Lazo abierto.....	25
Figura 16. Lazo cerrado.....	25
Figura 17. Servomecanismo	26
Figura 18. Segunda ley de Newton.....	27
Figura 19. Elementos principales de sistemas mecánicos de traslación.....	28
Figura 20. Elementos mecánicos en paralelo	29
Figura 21. Elementos mecánicos en serie.....	30
Figura 22. Elementos principales de sistemas mecánicos de rotación	31
Figura 23. Descripción de elementos mecánicos de rotación.....	32

Figura 24. Componentes básicos de sistemas eléctricos	33
Figura 25. Circuito serie	34
Figura 26. Circuito paralelo.....	35
Figura 27. Sistema control lineal discreto variable	41
Figura 28. Sistema control lineal discreto constante	42
Figura 29. Sismómetros horizontal y vertical.....	53
Figura 30. Sismograma horizontal.	53
Figura 31. Descripción del sismograma	54
Figura 32. Sismógrafo permanente.....	54
Figura 33. Sismógrafo temporal	55
Figura 34. Matlab en cálculos numéricos	56
Figura 35. Jerarquía	56
Figura 36. Simulación de un sismómetro con Simulink.....	57
Figura 37. Simulink y una interface para control de hardware	57
Figura 38. Formando un objeto para simulación con Vrealm build.....	58
Figura 39. Modelo matemático de un sismómetro horizontal	59
Figura 40. Armando los bloques con Simulink	61
Figura 41. Insertando valores en los bloques con Simulink	61
Figura 42. Valores configurados con Simulink	61
Figura 43. Visualización de señales	62
Figura 44. Página de inicio de Matlab.....	64
Figura 45. Asignación de valores a las variables.....	64
Figura 46. Diagrama en bloques con Simulink	65
Figura 47. Diagrama comprimido	65
Figura 48. Inicio de simulación	66

Figura 49. Inicio del simulador Vrealm builder 2.0	66
Figura 50. Iniciando la creación de bloques	67
Figura 51. Asignar dimensiones a los bloques	67
Figura 52. Ejemplo de bloque dimensionado	68
Figura 53. Creación de enlace	68
Figura 54. Asignar funciones a cada bloque.....	69
Figura 55. Funciones asignadas.....	69
Figura 56. Vectores de sismógrafo	73
Figura 57. Efectos de sismos	74
Figura 58. Ondas compresionales P	75
Figura 59. Ondas transversales S.....	75
Figura 60. Ondas R, Rayleigh	75
Figura 61. Ondas de Love.....	76
Figura 62. Cortes en la tierra	76
Figura 63. Tipos de ondas.....	76
Figura 64. Velocidades de las ondas P, S, R y L	77
Figura 65. Magnitud e intensidad de los sismos.....	78
Figura 66. Sismógrafos horizontal y vertical.....	79
Figura 67. Características de Matlab	80
Figura 68. Ciclo de la S-Function.....	82
Figura 69. Creación mundo virtual.....	83

Introducción

El tema tratado en la presenta monografía, se relaciona directamente con los sistemas de control, tema íntimamente relacionado con lo que en los tiempos actuales se denomina automatización, pero cuyos orígenes se remontan desde que el hombre empieza a conocer y comprender los fenómenos que existen en la naturaleza, buscando aplicar este conocimiento a la satisfacción de necesidades tanto personales como colectivas, desarrollando tal vez sin darse cuenta, de lo que actualmente recibe el nombre de tecnología.

Las primeras soluciones que nuestros antepasados le dieron a los problemas planteados, con respecto a temas de automatización sin haber desarrollado un esquema concreto sobre ello, fueron en base a criterios obtenidos durante una larga etapa de experimentación, que condujo a obtener otros conocimientos que le servirían para otros proyectos y en ese transcurrir se inicia el cimiento de todo un campo que ha cobrado tal importancia, que ha generado campos específicos como la automatización y la robótica.

Entre los campos relacionados con la ciencia que se han generado producto de esta evolución son la electricidad, cuyo aporte significativo ha sido la de crear una teoría sólida con respecto al flujo de electrones que es capaz de generar trabajo; la electrónica, construyendo dispositivos y componentes acorde a la tecnología que se emplee; mecánica, diseñando formas apropiadas de materiales sólidos y estableciendo requerimientos técnicos; informática, creando programas para fines específicos, etc.

Con el desarrollo continuo de la ciencia y la consecuente tecnología, en los diversos campos de aplicación de los conocimientos que se han ido obteniendo, es posible analizar los fenómenos físicos y químicos que se producen en la naturaleza en estado continuo, en modelos matemáticos basados en estados discretos, cuyos resultados que se obtienen

prácticamente son iguales a los que suceden en la realidad, tema que se relaciona directamente con la investigación plasmada en este trabajo monográfico, el cual contiene los siguientes capítulos:

En el primer capítulo se realiza una descripción integral de los sistemas controlados, iniciando con la conceptualización, evolución generacional y tecnológica a través del tiempo, las aplicaciones que han sobresalido, los modelos matemáticos que explican su funcionamiento y los sistemas analógicos primigenios que posteriormente se han convertido a sistemas digitales; en el segundo capítulo se trata el modelamiento en función de ecuaciones matemáticas, fundamentalmente las ecuaciones diferenciales, con las cuales se logra una representación de los fenómenos físicos que van a ser estudiados, para posteriormente extraer resultados que servirán para la elaboración física de las etapas contempladas en el estudio; el tercer capítulo trata sobre un proyecto de aplicación, consistente en la simulación de un sismómetro mecánico en tres dimensiones o 3D, utilizando el programa Matlab, conjuntamente con el Simulink y también con el Vrealm Builder; finalmente para concluir se desarrolla la aplicación didáctica referido al tema tratado en el proyecto, en la que se encuentra la sesión de aprendizaje y la hoja de información que se requiere para impartir la enseñanza aprendizaje de este tema. Además, la síntesis, apreciación crítica y sugerencias, y referencias.

Capítulo I

Fundamentos de los sistemas de control

1.1 Definición

Carrillo (2011) definió con respecto a este tema, que es un sistema integrado compuesto por varias etapas y una diversidad de elementos, los cuales tienen necesariamente que interactuar, en un orden y secuencia establecida, con el objetivo principal de obtener una salida con determinadas características, ante la entrada de una o varias señales.

Asimismo, Rodríguez (2003) refirió al respecto, que los sistemas referidos se caracterizan por englobar a elementos relacionados entre sí, de manera que se obtenga una determinada respuesta, producto de alguna orden o una autorregulación que provenga del sistema y así lograr la salida requerida; al final el objetivo es obtener una salida controlada, acorde a las señales que ingresan.

Gil (2010) expresó, que son variados dispositivos actuando en conjunto, para cumplir funciones de autorregulación o control de otros sistemas, realizando acciones predeterminadas, minimizando fallas y lograra el resultado anhelado.

Tomando en cuenta las definiciones anteriores, se percibe claramente que en estos sistemas hay señal o señales que ingresan, las cuales son sometidos a diversos procesos, ya

sean mecánicos, eléctricos, electrónicos o una mezcla de ellos, para obtener resultados en la salida, previstos en el diseño.

1.2 Evolución de los sistemas de control

El ser humano ha demostrado a través de su evolución, que es capaz de aplicar los conocimientos adquiridos, en su inagotable esfuerzo por conocer la naturaleza donde reside, en dar soluciones a proyectos de diversa índole con mucha creatividad e ingenio, más aún cuando se trata de mejorar la calidad de vida de los demás y satisfacer necesidades prioritarias para el desarrollo de la sociedad (Piedrafita, 1999).

Uno de los temas que han servido de gran motivación a los hombres desde la antigüedad, es el hecho de crear sistemas que realicen diversas acciones por si solas, sin intervención continua de la mano del hombre, iniciándose desde aquel entonces la idea primigenia de automatización y los indesligables sistemas de control, que en sus inicios contaba con una tecnología incipiente, basada en los materiales que directamente le brindaba la naturaleza, pero que poco a poco ha ido evolucionando, hasta llegar al desarrollo de la tecnología que hoy tenemos, con auxilio de la electricidad, electrónica e informática (Bullón, 2009).

A grandes rasgos, la evolución histórica de los sistemas de control desde el siglo pasado, es muy variada y digna de elogio por la demostración de creatividad e ingenio empleada, como por ejemplo en los albores del primer siglo se ideo un sistema que era capaz de abrir y cerrar la puerta de un templo diseñado por Herón, con solo aprovechar el calor al encender fuego encima de una cubeta y propiciar el calentamiento del aire, el cual al expandirse logra llenar con agua un depósito que se encuentra debajo, produciendo la apertura de la puerta del templo; para cerrar la puerta hay que apagar el fuego o simplemente atenuarlo y el proceso se invierte y se logra cerrar la puerta (Pérez, 2007).

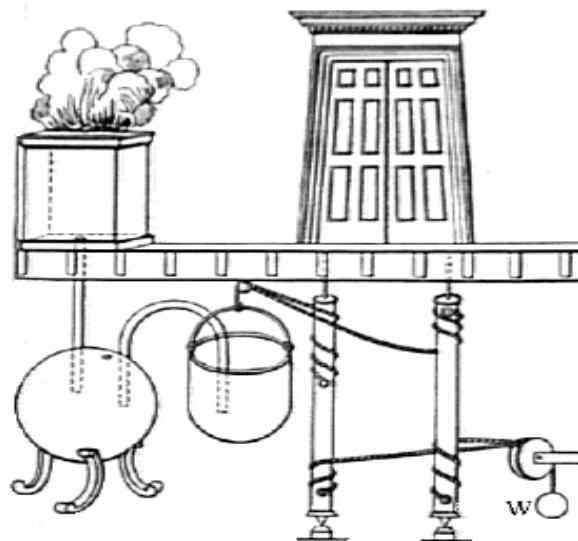


Figura 1. Puerta de Herón. Fuente: Recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>

Otra de las obras que cobraron relevancia en su época fue el denominado Clepsydra, que fue el primer reloj inventado por Ktsibios y que fue motivo de réplica posteriormente, pero para diversas aplicaciones, consistía en el abastecimiento de agua a través de un conducto con flujo constante hacia un recipiente, en la que estaba implementado un mecanismo con flotador, que cumplía con la función de regular en forma automática el caudal de agua que debía de ingresar al sistema (Bullón, 2009).

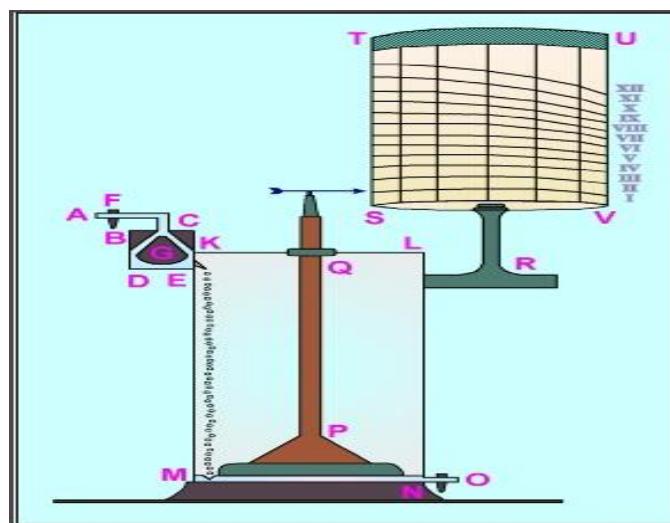


Figura 2. Reloj de Ktsibios. Fuente: Recuperado de <https://sites.google.com/site/sistemasdecontrolpenagos/historia>

Una variante de este reloj, lo constituye el diseño ideado por Platón para obtener un reloj despertador conocido como Clepsydra, naciendo la idea por la necesidad de que sus alumnos se despertaran a la hora indicada y puedan asistir en forma puntual a sus clases (Piedrafita, 1999).

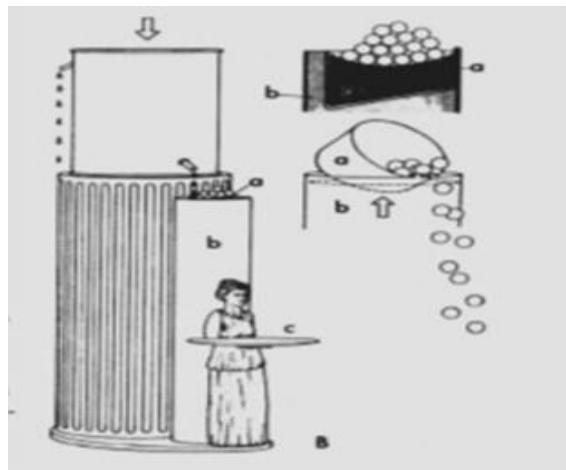


Figura 3. Clepsydra de Platón. Fuente: Piedrafita, 1999.

En este proceso evolutivo de mecanismos automatizados sale a relucir Philón, quien era natural de Bizancio y fue quien realizó un invento basado en mantener una lámpara de aceite encendida, utilizando una técnica innovadora consistente en la alimentación continua de aceite, que se encontraba en otro compartimiento que actuaba como un abastecedor (Gómez, 2019).

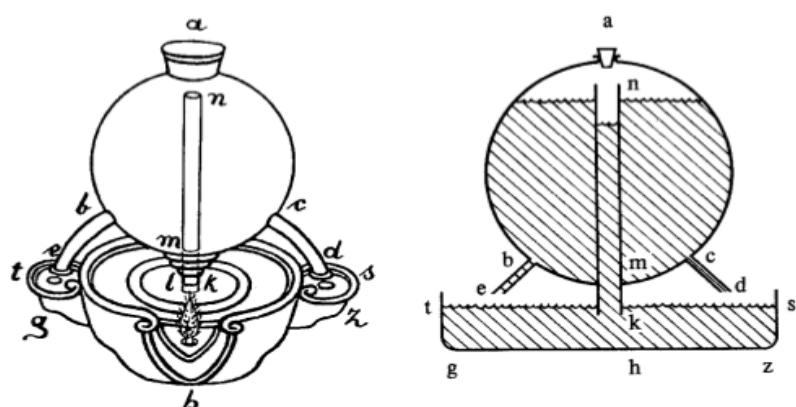


Figura 4. Lámpara de Philón. Fuente: Recuperado de <http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/grecia-ii-filon-de-bizancio.html>

En otra etapa de la historia y con los antecedentes de grandes inventos que incentivaron a grandes mentes, en proseguir con la automatización utilizando ingeniosos sistemas de control, se produce un cambio notable debido a que estos inventos comenzaron a emplearse en la industria, con la finalidad de mejorar la producción en serie, naciendo una nueva era denominada como revolución industrial.

El punto de partida de esta revolución, es el diseño y construcción de los molinos que se hicieron trabajar con la energía eólica y que eran utilizadas en la molienda de diferentes tipos de granos; luego se propicia la construcción de hornos siempre para fines industriales y ante el requerimiento de la energía en forma de vapor, se diseñan las primeras calderas que fueron el punto de partida para la construcción de la primera máquina de vapor, ideado por James Watt (Carrillo, Arocena y Lera, 2010).



Figura 5. Molino de viento URSS. Fuente: Recuperado de <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/02/05.htm>

En la figura se muestra uno de los primeros hornos de coque, que se construyeron para fines industriales.

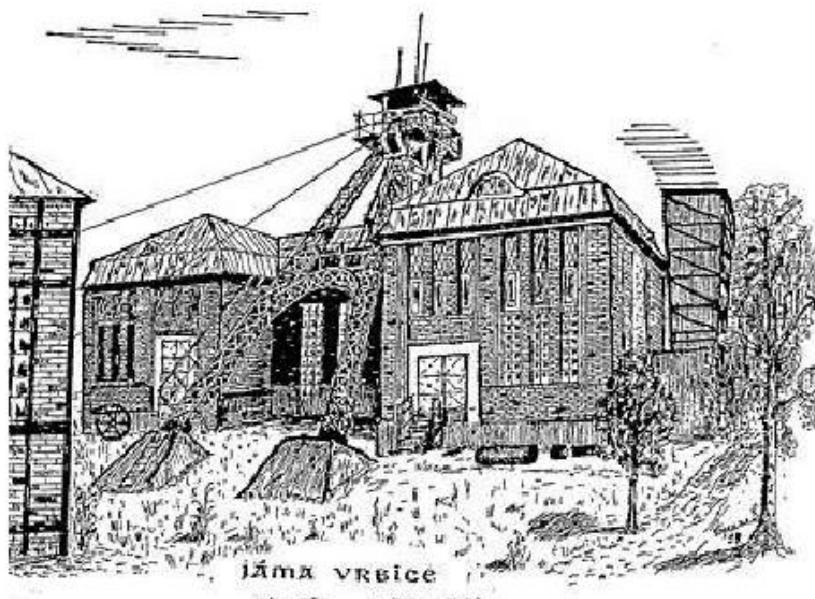


Figura 6. Horno de coque. Fuente: Recuperado de <https://pt.slideshare.net/heberq/primera-revolucion-industrial/14?smtNoRedir=1>

Un gran avance para el desarrollo de la industria en general, lo constituyó el invento de James Watt consistente en una máquina que utilizaba el vapor como fuente de energía, logrando el desplazamiento de grandes volúmenes de carga sin mayor esfuerzo, por lo que sirvió de base para la industria del transporte y otras que la adaptaron a sus propios fines (Carrillo *et al.*, 2010).

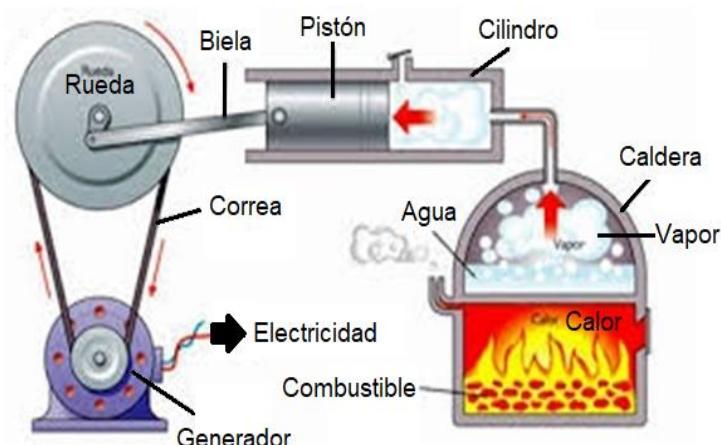


Figura 7. Máquina de vapor. Fuente: Recuperado de <https://sites.google.com/site/trabajolasmaquinastermicas/la-m>

Después de esta revolución, la tecnología se ha ido desarrollando en todos las especialidades de la ciencia, siendo la mecánica el área que representa el pilar de todo el sistema, también la electrónica tiene una contribución muy significativa en estos sistemas, ya que ha permitido la reducción de tamaño, exactitud en los tiempos y otras ventajas de orden general, inclusive se ha unido con la informática con la cual se ha logrado realizar programaciones diversas, con la finalidad de adaptarse a diversos usos con tan solo realizar la programación adecuada.

A inicios del siglo XX, tiene lugar la presentación de algunos inventos que impactaron por la particularidad de las acciones que realizaban y por contar con sistemas retroalimentados, que resaltaban el accionar de estos dispositivos, los cuales fueron diseñados y elaborados por el ingeniero español Torres Quevedo, siendo los más sobresalientes el dispositivo denominado el ajedrecista, que realizaba jugadas y siempre ganaba, también un dirigible diseñado con un nuevo sistema de suspensión, el autómata bautizado con el nombre de teleokino que funcionaba con mando a distancia y un funicular para unir dos lugares en el río Niágara (Brunete, San-segundo y Herrero, 2020).

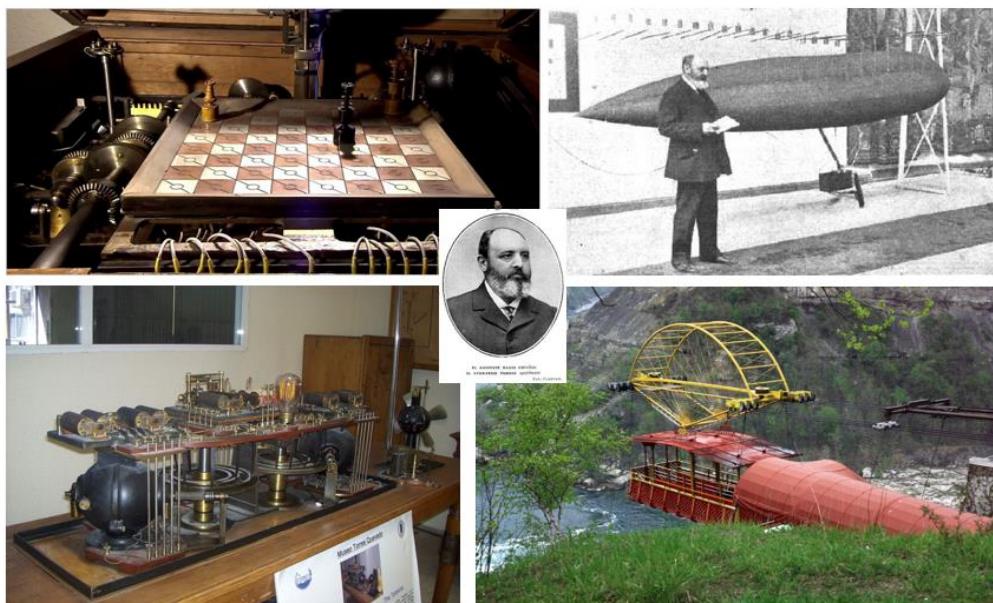


Figura 8. Inventos de Torres Quevedo. Fuente: Brunete *et al.*

Vargas (2010) refiere en su trabajo en la que hace un relato histórico, que en los inicios del siglo XX comienzan a desarrollarse los primeros diseños de controladores, que incorporaron la retroalimentación en sus circuitos para lograr una mejor performance, siendo las magnitudes a sensar, las siguientes: (a) tensión o voltaje, (b) intensidad o corriente, (c) frecuencia y (d) cantidad de vapor.

Brunete *et al.* (2020), relata que en el 1913 la compañía de carros Ford, implementa una línea de producción automática, en 1944 Aiken construye el ordenador Mark I, en 1946 se construye ENIAC la primera computadora, en 1948 se inventa el transistor, en 1958 se inventa el microchip, en 1968 se crea el PLC, a partir de los años 1990 hacia nuestros tiempos, se han desarrollado sofisticados sistemas automatizados.



Figura 9. Sistemas modernos de control. Fuente: Recuperado de <https://www.autycom.com/arquitectura-y-componentes-del-sistema-automatizado/>

1.3 Conceptos básicos

Carrillo (2011) define varios términos utilizados en los diversos sistemas controlados en lo que respecta a automatización, los cuales son comunes entre ellos y que es necesario

entender sus conceptos para una mejor comprensión del tema tratado, siendo los principales los siguientes:

1.3.1 Planta.

Independientemente de la actividad que realiza, involucra a todo el conjunto de instalaciones que necesariamente tienen que efectuarse, para instalar un determinado sistema en la que se lleva a cabo el o los procesos que se requieren, para obtener un resultado previsto. También puede ser un objeto físico que es sometido a control, por ejemplo, un horno al cual se le controla la temperatura.



Figura 10. Planta de biogás. Fuente: Recuperado de <https://www.energias-renovables.com/biogas/en-marcha-la-primer-planta-que-convierte-20190918>

1.3.2 Proceso.

Son operaciones que se realizan en forma continua, en la que se producen cambios de forma gradual, que son debidamente controlados y que finalmente van a llevar a la obtención de un producto final debidamente planificado.



Figura 11. Proceso industrial. Fuente: Recuperado de <http://www.noticias.unsl.edu.ar/01/03/2019/coneau-reconocio-a-la-especializacion-en-calidad-de-procesos-industriales/>

1.3.3 Sistema.

Un sistema, engloba a todos los elementos que participan de forma organizada, para obtener un resultado que ha sido previsto con antelación, involucra dispositivos, procesos, controles y otros, de acuerdo a la actividad a la que se dedica.

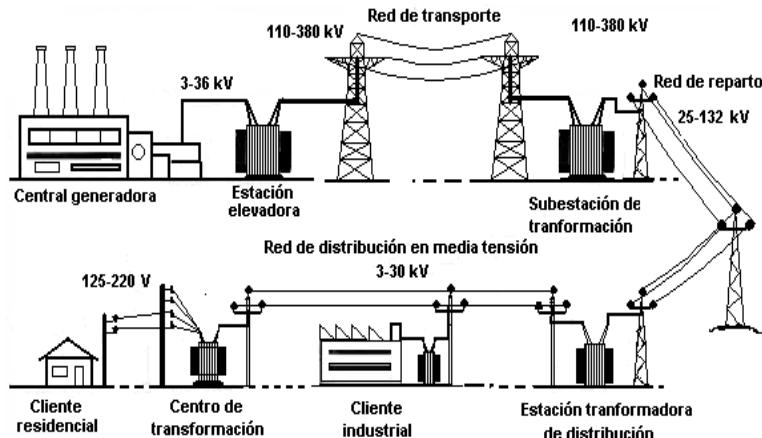


Figura 12. Sistema de suministro eléctrico. Fuente: Recuperado de <http://www.sde.mx/que-es-el-sistema-de-suministro-electrico/>

1.3.4 Entrada.

Es considerada una entrada, aunque también puede recibir el nombre de estímulo, toda señal que debe de ingresar a un determinado sistema para que pueda ser controlada,

de acuerdo a especificaciones contenidas en el proceso. Hay dos tipos de entradas, las de referencia, que son las que están contempladas en el diseño y las de perturbación, que son aquellas que no deben ingresar ya sea que se generen en el mismo sistema o que provengan del exterior, ya que pueden afectar el correcto funcionamiento del sistema.

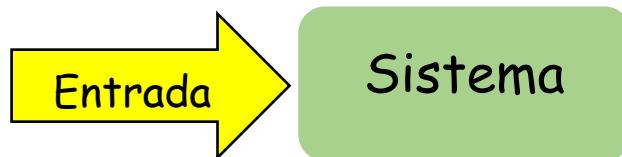


Figura 13. Entrada de señal al sistema. Fuente: Autoría propia.

1.3.5 Salida.

Representa la señal o señales respuesta o aquella que es requerida y que ha sido motivo del diseño del sistema del cual se obtiene, aunque también se le menciona como aquella variable que es controlada.

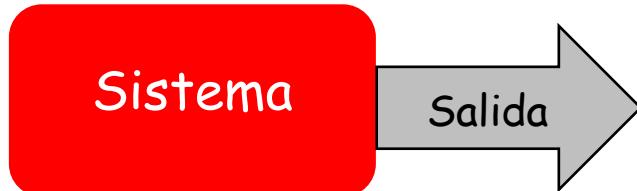


Figura 14. Salida de señal del sistema. Fuente: Autoría propia.

1.4 Tipos de sistemas de control

Carrillo (2011) indicó, que en el diseño de estos sistemas se contemplan dos tipos bien definidos, los de lazo abierto y aquellos que utilizan el lazo cerrado, los cuales se describen a continuación.

1.4.1 Lazo abierto.

Sistemas de funcionamiento singular, en los que durante el proceso a la cual son sometidas la señal o señales de entrada, no hay comunicación entre la salida obtenida y la entrada, es decir, no se produce la retroalimentación. Como ejemplos en la vida cotidiana, se puede mencionar a las lavadoras de ropa, que solo realizan acciones basadas en los tiempos, sin hacer verificaciones de que se hayan quitado las manchas; los semáforos convencionales en las intersecciones, que actúan en base a los tiempos programados, sin verificar el flujo del tráfico o de que haya habido un accidente y se tenga que tomar alguna decisión alterna.

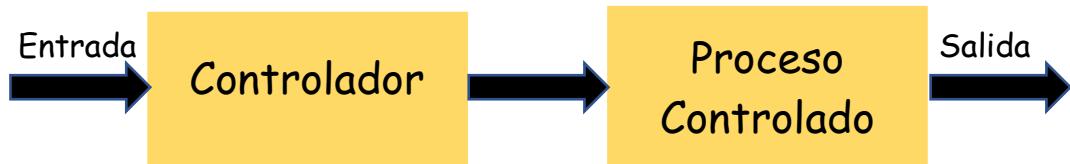


Figura 15. Lazo abierto. Fuente: Autoría propia.

1.4.2 Lazo cerrado.

Estos sistemas tienen como particularidad, que hay una comunicación constante entre la salida y la entrada, cuyo fundamento es corregir un error detectado y mantener el estado de la salida, dentro de los niveles de variación permitidos y contemplados en el diseño, obteniendo la ventaja adicional que aquellas señales que pueden perturbar el proceso, sean eliminadas.

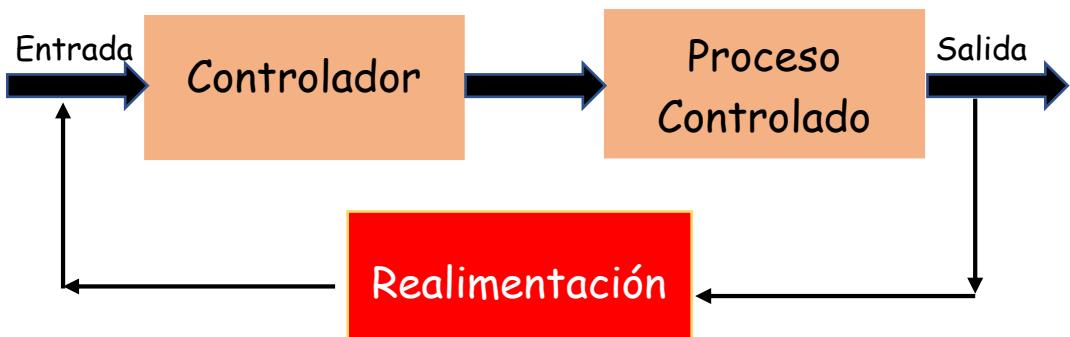


Figura 16. Lazo cerrado. Fuente: Autoría propia.

1.4.3 Servomecanismo.

Es un sistema especial que ejerce un control mecánico debido a la acción de un circuito que actúa como retroalimentador, para controlar la posición angular de un motor y la velocidad del mismo.

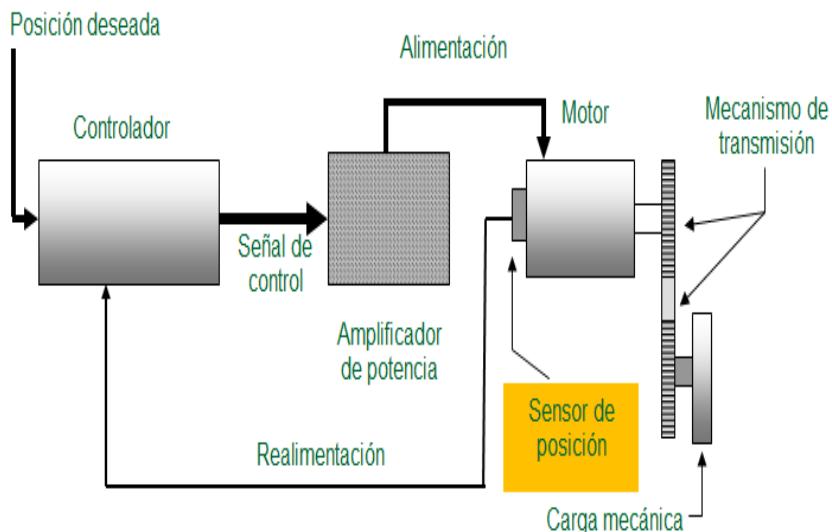


Figura 17. Servomecanismo. Fuente: Recuperado de https://www.ctrl.cinvestav.mx/~garrido/lineasdeinvest_rgarridoo.html

1.5 Modelos matemáticos de sistemas físicos

Un modelo puede ser definido como un sustituto o una forma de representar un fenómeno físico o un sistema, con cierto grado de aproximación en el resultado esperado a obtener; pero cuando se hace referencia expresa a un modelo matemático, es cuando esta representación se realiza mediante cálculos, que utilizan ecuaciones de diferentes clases y ordenes, de acuerdo al sistema cuya dinámica es motivo de estudio. Los principales sistemas representados por modelos, son: (a) mecánicos, (b) eléctricos, (c) nivel de líquidos, y (d) térmicos.

1.5.1 Sistemas mecánicos.

Son los que existen más en la naturaleza, ya que todo cuerpo o materia tiene este tipo de comportamiento, ya sea para ser trasladado de un lugar a otro o para que pueda girar en algún sentido específico. La ley física relacionada con el desplazamiento o translación de los cuerpos es la segunda ley de Newton, que expresa la relación entre la fuerza, masa y aceleración, mediante la siguiente fórmula:

$$\sum f = m * a$$

En la figura se tiene un ejemplo de este modelo mecánico en cuanto a translación de un objeto con diferente masa.

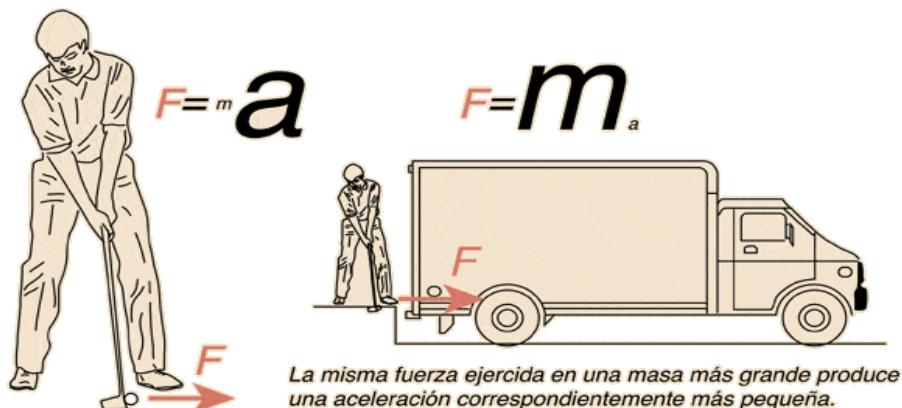


Figura 18. Segunda ley de Newton. Fuente: Recuperado de <https://fdocuments.es/document/modelos-matematicos-de-sistemas-fisicos.html>

Cuando se trata de rotar o girar un cuerpo, es aplicable también la segunda ley de Newton, pero aplicada al torque como se indica en la siguiente fórmula:

$$\sum \tau = J * \alpha$$

La relación expresada en la fórmula, muestra la relación entre el torque que es la fuerza para propiciar el giro, el momento de inercia que depende de la masa del cuerpo y la aceleración angular que es la cantidad de giro.

1.5.1.1 Sistemas mecánicos de traslación.

Estos sistemas contemplan variables que se encuentran relacionadas con desplazamientos de masa, como son la velocidad con la que se produce, la aceleración de acuerdo al medio y la fuerza necesaria para que se produzca el efecto deseado.

Los elementos fundamentales que la constituyen, se encuentran detallados en la siguiente figura, donde se muestra el elemento, símbolo representativo, ecuación y las unidades de medida.

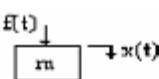
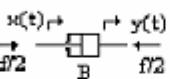
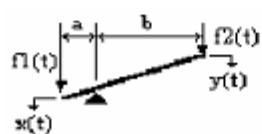
Masa		$f_m = m \cdot \frac{d^2}{dt^2} x(t)$	$[Kg]$ ó $[N \cdot s / m]$
Amortiguador		$f_B = B \cdot \frac{d}{dt} [x(t) - y(t)]$	Coeficiente de fricción viscosa $B = [Ns \cdot m / m]$
Resorte		$f_s = K \cdot [x(t) - y(t)]$	Módulo de elasticidad $K = [N / m]$
Palanca		$y = \frac{b}{a+b} \cdot x$ $f_2 = \frac{b}{a+b} \cdot f_1$	Adimensional

Figura 19. Elementos principales de sistemas mecánicos de traslación. Fuente: Recuperado de <https://fdocuments.es/document/modelos-matematicos-de-sistemas-fisicos.html>

Teniendo en cuenta la forma como se encuentran dispuestos estos elementos, es que se producen dos tipos de configuraciones. (a) en serie, y (b) en paralelo.

1.5.1.1.1 Elementos mecánicos en paralelo.

Se caracterizan por que la aplicación de la fuerza $f(t)$, recae a los demás elementos en la misma dirección.

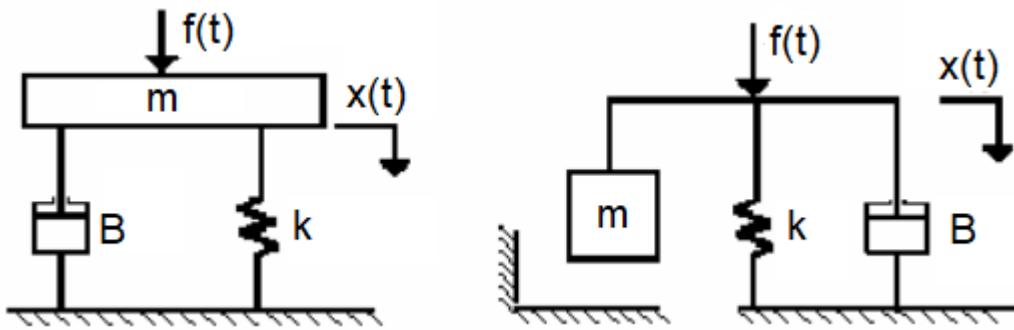


Figura 20. Elementos mecánicos en paralelo. Fuente: Recuperado de <https://fdocuments.es/document/modelos-matematicos-de-sistemas-fisicos.html>

La ecuación que contiene a todos los elementos y con la que se resuelve un problema de esta naturaleza, es:

$$f(t) = m * \frac{d^2}{dt^2}x(t) + B * \frac{d}{dt}x(t) + k * x(t)$$

Aplicando Laplace cuando las condiciones con las que se inicia es cero, entonces se tiene la siguiente expresión:

$$F(s) = (ms^2 + Bs + k)X(s)$$

Para este caso, la denominada impedancia mecánica, es uno de los términos de la ecuación anterior:

$$Z(s) = (ms^2 + Bs + k)$$

1.5.1.1.2 Elementos mecánicos en serie.

La fuerza que se aplica $f(t)$, se distribuye a todos los elementos que se encuentran apilados uno a continuación de otros, por lo que el desplazamiento total es igual a la sumatoria de desplazamientos parciales producidos por cada elemento que la constituye o forma parte del modelo. La ecuación es:

$$X(s) = \frac{F(s)}{k} + \frac{F(s)}{B_1 s} + \frac{F(s)}{B_2 s}$$

Para determinar la relación fuerza y desplazamiento, se despeja de la ecuación anterior, obteniendo:

$$F(s) = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{B_1 s} + \frac{1}{B_2 s}} X(s)$$

La impedancia mecánica adopta la siguiente expresión:

$$Z(s) = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{B_1 s} + \frac{1}{B_2 s}}$$

El esquema que representa a este tipo de sistemas, es la que se muestra a continuación:

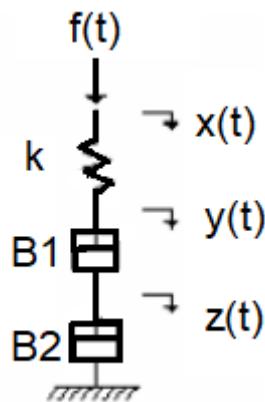


Figura 21. Elementos mecánicos en serie. Fuente: Recuperado de <https://fdocuments.es/document/modelos-matematicos-de-sistemas-fisicos.html>

1.5.1.2 Sistemas mecánicos de rotación.

Son sistemas muy utilizados en todo tipo de diseños, que requieren necesariamente de la implementación de cualquier tipo de motor, o algún dispositivo que ejecute actividad giratoria; los elementos que la constituyen, así como sus símbolos, ecuaciones y las unidades con las que se mide, son las que se muestran en la figura siguiente:

Momento de inercia		$T(t) = J \cdot \frac{d^2}{dt^2} \theta(t)$	$[N \text{ m seg}^2 / rad]$
Rozamiento		$T_f(t) = B \cdot \frac{d}{dt} [\theta_a(t) - \theta_b(t)]$	$[N \text{ m seg / rad}]$
Deformación		$T_d(t) = K \cdot [\theta_a(t) - \theta_b(t)]$	$[N \text{ m / rad}]$
Tren de Engranajes		$T_2(t) = \frac{N_2}{N_1} \cdot T_1(t)$ $T_2(t) = \frac{N_1}{N_2} \cdot \theta_1(t)$	Adimensional

Figura 22. Elementos principales de sistemas mecánicos de rotación. Fuente: Recuperado de <https://fdocuments.es/document/modelos-matematicos-de-sistemas-fisicos.html>

Tienen diversas aplicaciones como, por ejemplo, los tornos para la elaboración de toda forma de piezas, cajas de transmisión utilizadas mayormente en los automóviles, elevación de cargas mediante sistema de poleas, turbinas de reacción, etc.

En la ecuación que la representa, se encuentran variables como el par de fuerzas, llamado también torque, radio que presenta el eje, desplazamiento, velocidad y aceleración angular, todos ellos se encuentran contenidas en la siguiente expresión:

$$\tau(t) = r * f(t)$$

El par de fuerzas se encuentra representado por:

$$\theta(t) = \frac{x(t)}{r}$$

En equilibrio de tiene lo siguiente:

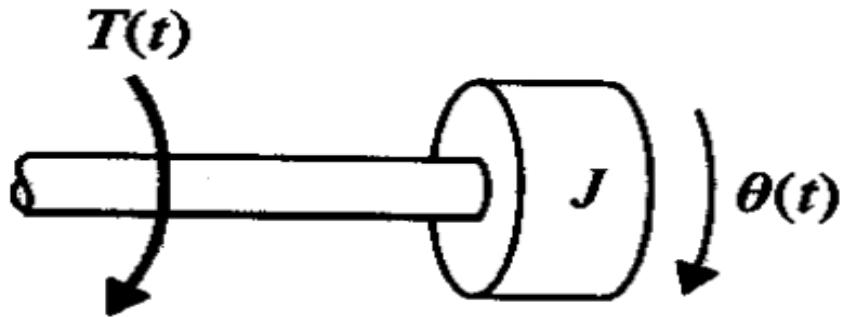


Figura 23. Elementos principales de sistemas mecánicos de rotación. Fuente: Recuperado de http://isa.uniovi.es/docencia/ra_marina/UCLM_TEMA3.PDF

El equilibrio entre los términos de la ecuación, se encuentra expresada de la siguiente forma:

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = T(t) - f \frac{d\theta(t)}{dt}$$

En la que:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad y \quad \dot{\omega}(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}$$

Si se aplica Laplace, se tiene la siguiente expresión:

$$J * s^2 + f * s * \Omega(s) = T(s)$$

Para determinar la relación entre la velocidad angular que sale del sistema y fuerza par de entrada, se tiene:

$$\frac{\Omega(s)}{T(s)} = \frac{1}{J * s^2 + f * s}$$

1.5.2 Sistemas eléctricos.

Son sistemas que contienen diversas variables cuya naturaleza es eléctrica, que cuentan con dispositivos que funcionan con determinadas tensiones o voltajes y flujos de

corriente, que son justamente magnitudes eléctricas que se encuentran relacionadas mediante leyes específicas, enunciadas por Kirchhoff.

La primera ley se relaciona con la sumatoria de las tensiones o voltajes en una trayectoria cerrada, que debe ser cero, la cual se encuentra representada por la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 0$$

La segunda ley se refiere a que la sumatoria de todas las corrientes en un nodo, debe arrojar el valor de cero, debido a que las corrientes que entran deben ser igual a las corrientes que salen del mismo nodo, la fórmula es:

$$\sum_{i=1}^n i_i = 0$$

Los componentes básicos son, la resistencia, el capacitor y el inductor, los cuales se presentan en la siguiente figura, en la que se muestran también el símbolo y la fórmula que los representan.

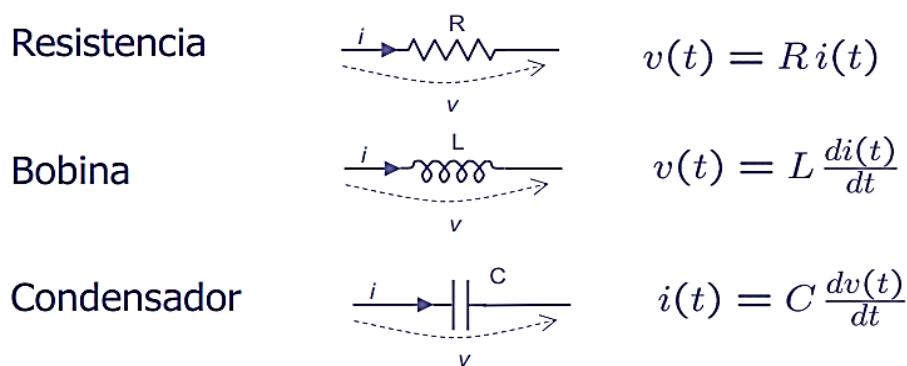


Figura 24. Componentes básicos de sistemas eléctricos. Fuente: Recuperado de https://frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/8716/mod_resource/content/0/Tema3.pdf

Por la disposición de sus elementos, se subdividen en: (a) sistemas eléctricos en serie, y (b) sistemas eléctricos en paralelo.

1.5.2.1 Sistemas eléctricos en serie.

Se denominan en serie, cuando en todos los componentes que conforman un circuito determinado, circula la misma cantidad de corriente medida en amperios o uno de sus submúltiplos; en la figura se muestra un circuito serie, compuesto por resistencia, inductancia y capacitor, denominado generalmente como circuito RLC.

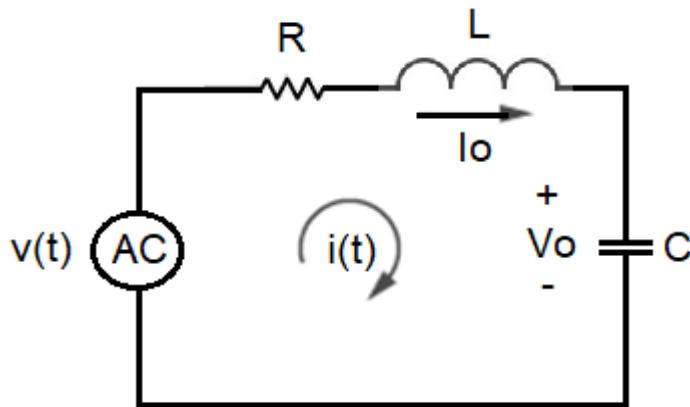


Figura 25. Circuito serie. Fuente: Recuperado de <https://dademuch.com/2020/05/03/circuito-rlc-en-serie-analisis-y-ejemplos/>

La ecuación de acuerdo a la ley de Kirchhoff, es:

$$v(t) = R * i(t) + L * \frac{d}{dt} i(t) + \frac{1}{C} * \int i(t) dt$$

El voltaje que hay a la salida, tendrá el siguiente valor:

$$v_o(t) = \frac{1}{C} * \int i(t) dt$$

Estableciendo relaciones entre los voltajes y la corriente que circula por el circuito:

$$V(s) = R * I(s) + sL * I(s) + \frac{1}{sC} I(s)$$

$$V_o(s) = \frac{1}{sC} I(s)$$

En ambas ecuaciones precedentes, se aplica Laplace para obtener la siguiente expresión:

$$V(s) = RCsV_0 + LCs^2V_0(s) + V_0(s)$$

La expresión que se obtiene al establecer una relación, entre la salida del circuito de acuerdo a la entrada, es:

$$\frac{V_0(s)}{V(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

1.5.2.2 Sistemas eléctricos en paralelo.

Se denominan en paralelo, cuando todos los componentes que corresponden al circuito, tienen la misma cantidad de tensión o se encuentran sometidas a la misma diferencia de potencial, sin embargo, la corriente que circula por cada uno de ellos, depende de las características propias de cada componente.

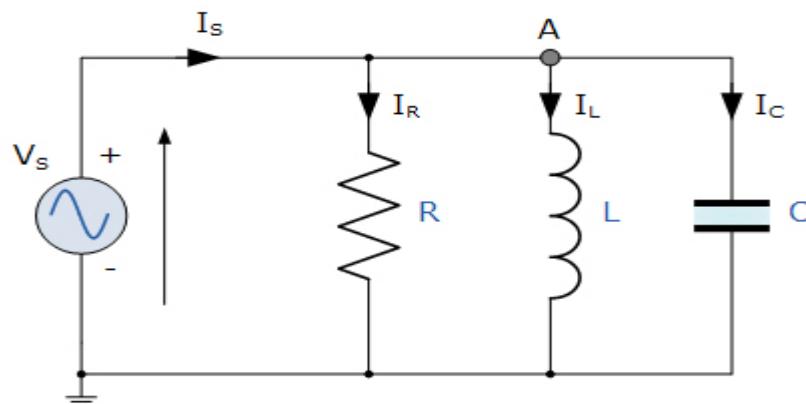


Figura 26. Circuito paralelo. Fuente: Recuperado de <http://tutorialesdeelectronicabasica.blogspot.com/2016/06/paralelo-circuito-rlc-y-analisis-del.html>

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff en el circuito:

$$i(t) - i_R(t) - i_L(t) - i_C(t) = 0$$

Reemplazando cada término, por su equivalente de corriente:

$$i(t) - \frac{v_a(t)}{R} - \frac{1}{L} \frac{dv_a(t)}{dt} - C \int v_a(t) dt = 0$$

Empleando Laplace, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{V_a(s)}{I(s)} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{sL} + sC}$$

Capítulo II

Modelamiento en el espacio de estado

2.1 Definición

Carrillo (2011) refiere con respecto al modelamiento, que es una forma conveniente de representar un sistema controlado, para realizar en primer lugar, el análisis adecuado al sistema en estudio, con el auxilio de la ciencia matemática que le sirve de fundamento, para posteriormente realizar el diseño que le corresponda, de acuerdo a las variables contempladas y los resultados que se esperan del sistema.

2.2 Base matemática

El uso o empleo de las matemáticas fortalece los resultados que se obtienen y que en este caso por ser sistemas diversos aplicados a magnitudes físicas sujetas a control, requieren de operaciones especiales que brinden respuestas apropiadas, siendo las principales las siguientes: (a) matrices, (b) ecuaciones diferenciales, (c) álgebra lineal, (d) probabilidades, (e) transformadas, (f) integrales, (g) derivadas, etc.

2.3 Conceptos básicos

Ogata (1996) indicó que los conceptos que se mencionan en este punto, se refieren a términos utilizados en los sistemas dinámicos que hacen referencia al espacio de estado, ya sean continuos o discretos, siendo importante hacer una definición clara y precisa con cada uno de ellos.

2.3.1 Estado.

El concepto de este término aplicado a los sistemas dinámicos, es determinar al conjunto de variables que intervienen en él, sin importar un número específico, ya que puede referirse a uno de mayor cantidad como a uno de menor cantidad, siempre y cuando se tenga conocimiento acerca del comportamiento de estas, al pasar de un tiempo cero a un tiempo mayor a cero, expresado en la siguiente forma:

$$t = t_0 \rightarrow t \geq t_0$$

La expresión describe la variación en el tiempo de las variables del sistema, se inicia con un tiempo inicial representado por t_0 y un tiempo posterior que es mayor al tiempo inicial; este concepto es aplicable a cualquier tipo de sistemas, no se encuentra restringido a un sistema específico.

2.3.2 Variables de estado.

Son aquellas que se encuentran definidas en el sistema, propiciando los cambios que se suscitan ante la variación del tiempo, estando representadas por:

$$x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$$

Estas variables van a determinar cuál es el estado en que se encuentra el sistema que las contiene, establecida su variación con respecto al tiempo; si hay n variables que intervienen, entonces todas ellas se denominan como variables de estado. Aunque estas

variables pueden ser cantidades obtenidas por medición física, también se contemplan aquellas que no pueden medirse e inclusive no ser observables, siendo lo más conveniente para obtener resultados más óptimos, hacer intervenir a aquellas que sean medibles por medios físicos.

2.3.3 Vector de estado.

El vector se encuentra conformado, por el número de variables que pertenecen al sistema y que describen como se comporta este, por lo tanto, si hay n variables consideradas de estado, el vector x estará compuesto por n componentes y va a representar a todo el sistema como $x(t)$.

2.3.4 Espacio de estado.

Corresponde al espacio dimensional, que en el caso de contener n dimensiones tendrá el mismo número de ejes, los cuales tendrán las siguientes denominaciones: eje X1, eje X2, ..., eje Xn; la ventaja de establecer un espacio de estado, es que en él se representa cualquier clase de estado.

2.3.5 Ecuaciones en el espacio de estado.

Las variables que se encuentran sujetas a estudio, consideradas en el modelo que las representa para su análisis, son las de entrada que pueden ser una o varias, de estado que son las n variables involucradas y de salida que es el resultado obtenido. La representación de un sistema puede darse de diversas formas, pero la cantidad de variables de estado no se alteran, siguen siendo las mismas.

La ecuación que es aplicada a aquellos sistemas que se caracterizan por su función, que se relaciona con la linealidad y también con los que no tienen linealidad, tanto para el estado como la salida, es:

$$x(k + 1) = f[x(k), u(k), k] \rightarrow \text{estado}$$

$$y(x) = g[x(k), u(k), k] \rightarrow \text{salida}$$

Para aquellos sistemas que tienen como característica, ser lineal, discreto y que varían a través del tiempo, estas ecuaciones pueden ser expresadas mediante simplificación de la siguiente forma:

$$x(k + 1) = G(k)x(k) + H(k)u(k) \rightarrow \text{estado}$$

$$y(k) = C(k)x(k) + D(k)u(k) \rightarrow \text{salida}$$

El significado de cada uno de los términos en ambas ecuaciones, es:

$$x(k) = \text{vector } n \rightarrow \text{estado}$$

$$y(k) = \text{vector } m \rightarrow \text{salida}$$

$$u(k) = \text{vector } r \rightarrow \text{entrada}$$

$$G(k) = \text{matriz } (n \times n) \rightarrow \text{estado}$$

$$H(k) = \text{matriz } (n \times r) \rightarrow \text{entrada}$$

$$C(k) = \text{matriz } (m \times n) \rightarrow \text{salida}$$

$$D(k) = \text{matriz } (m \times r) \rightarrow \text{transmisión directa}$$

Es necesario precisar que se utiliza la letra k como subíndice, para indicar que un vector o una matriz varían a través del tiempo; en el caso que no se coloque este subíndice, se sobre entenderá que no hay variabilidad en el transcurrir del tiempo, entonces es constante y las ecuaciones resultantes serán:

$$x(k + 1) = Gx(k) + Hu(k)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k)$$

El diagrama en bloques que representa a estas ecuaciones, es:

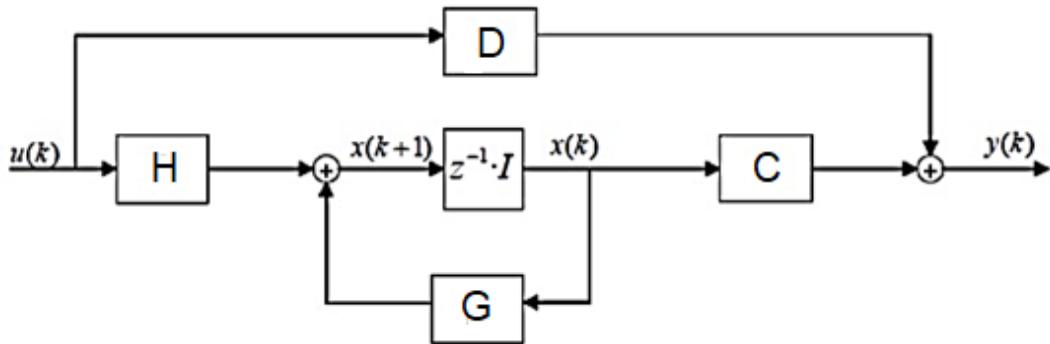


Figura 27. Sistema control lineal discreto constante. Fuente: Recuperado de Diaz, Aranda y De la Cruz (2006).

Para sistemas continuos sean o no lineales, las ecuaciones para el estado y salida serán las que se muestran:

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \rightarrow \text{estado}$$

$$y(t) = g[x(t), u(t), t] \rightarrow \text{salida}$$

Para sistemas que tienen como característica ser lineales, continuos y que varían con respecto al tiempo, las ecuaciones son:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \rightarrow \text{estado}$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \rightarrow \text{salida}$$

Si el sistema es constante, es decir no varía con el tiempo, entonces se produce una reducción de términos en las ecuaciones, quedando al final, de la siguiente manera:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \rightarrow \text{estado}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \rightarrow \text{salida}$$

La representación en bloques, de estas ecuaciones, es la que se detalla en la figura:

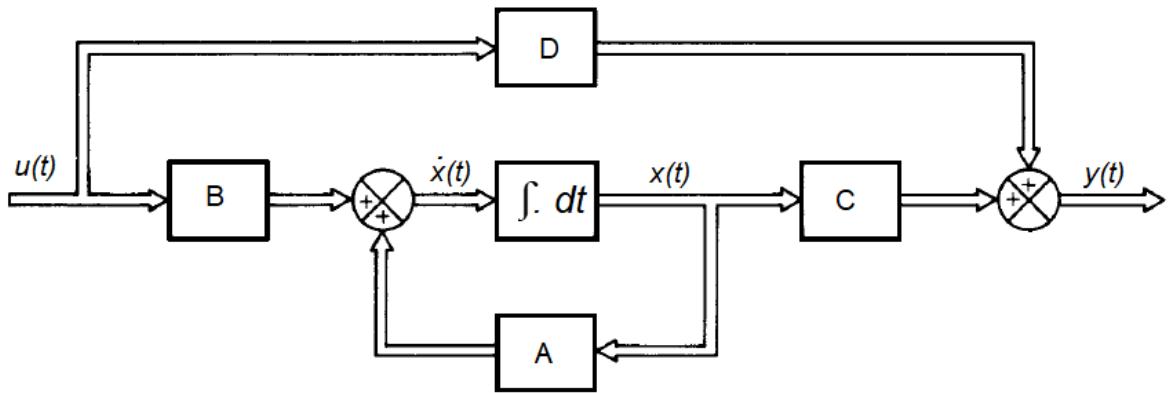


Figura 28. Sistema control lineal discreto constante. Fuente: Diaz, et al., 2006)

2.4 Limitaciones del control convencional

Este tipo de control con denominación de convencional por ser uno de las primeras formas de controlar sistemas, presenta ciertas limitaciones que se manifiestan por el uso de técnicas simples que solo requieren mínimas operaciones de cómputo, debido a que solo se relacionan los ingresos de las señales, el resultado que se produce a la salida y el control del error que pueda producirse; con todo este contenido, se procede al análisis del mismo y a la comprobación de resultados.

La desventaja importante que puede presentar este tipo de controles, es que solo se aplica a aquellos sistemas que se caracterizan por ser lineales y que son constantes, es decir, que no varían con el tiempo, por lo que solo presentan una sola entrada y salida en el sistema.

En otros sistemas no pueden ser aplicados, por motivo de la evolución que han surgido por el uso incessante de la tecnología, que incorpora etapas de control muy sofisticados que tienden a la automatización, utilizando circuitos con dispositivos muy especiales como los OPAM, microcontroladores, microprocesadores, circuitos integrados especiales como los OPAM, además de sensores diversos, que hacen funcionar posteriormente, a dispositivos actuadores.

2.5 Sistemas dinámicos

Son aquellos sistemas en los cuales los parámetros que la representan internamente, cambian en el transcurrir del tiempo, por lo que las reglas que las rigen vienen a ser temporales. Se les denomina sistemas, porque pueden ser representados por una o más ecuaciones, de acuerdo a la cantidad de etapas que contenga; se les denomina dinámicos, porque el valor de algún parámetro puede sufrir un cambio de cualquier magnitud, debido a la influencia de cualquier variable que la pueda afectar, siendo el más común la variable tiempo.

2.5.1 Clasificación.

Debido a la existencia de un gran número de sistemas que se caracterizan por ser dinámicos, es que se realiza la siguiente clasificación:

2.5.1.1 *Continuos.*

Tienen como característica principal, que se producen variaciones con respecto al tiempo en forma continuada, las cuales pueden ser representadas mediante ecuaciones diferenciales, que pueden ser ordinarias o derivadas parciales, con los que se pueden predecir los resultados con mucha aproximación; su aplicación más común es en electrónica analógica.

La ecuación que representa a estos sistemas, que contenga n dimensiones, es la siguiente:

$$\dot{x} = F(x)$$

Donde x representa valores de cada dimensión y que pertenecen al espacio n dimensional de los números reales que, expresado como vector de estado, se tiene:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n]^T$$

Derivando cada uno de estos elementos, se obtiene:

$$\cdot \quad x = d[x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n]^T$$

Por lo tanto, la función general F puede ser expresado contemplando las sub funciones obtenidas por derivación:

$$F = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_{n-1}(x), f_n(x)]^T$$

2.5.1.2 Discretos.

En este caso es lo inverso a los continuos, el tiempo transcurre en lapsos establecidos, denominados por esta razón discretos, cuyo comportamiento puede estar descrito mediante las ecuaciones de diferencias, que también reciben el nombre de mapas iterados. Son aplicables generalmente en electrónica digital

2.5.1.3 Autónomos.

Se denominan de esta manera, a aquellos sistemas en los cuales no se encuentran sujetos a algún factor externo, que pueda forzar su funcionamiento natural, siendo la ecuación que lo representa:

$$\dot{x} = F(x)$$

Como se observa, no hay ningún elemento adicional que impulse la variación del valor de x.

2.5.1.4 No autónomos.

También se le designa como sistema forzado, debido a que contiene un elemento al cual se encuentra supeditado para su funcionamiento, siendo el más común la variable tiempo, lo que se encuentra representado en la siguiente ecuación.

$$\dot{x} = F(x, t)$$

2.5.1.5 Invariantes con respecto al tiempo.

A los sistemas que tienen esta denominación, es porque tienen como característica principal, que su funcionamiento no se encuentra sujeto a la variable tiempo, estando representada matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$x(0) = x(\delta) = x_0 \Rightarrow x(t) = x(t + \delta); \forall t$$

La interpretación es que, si en el sistema se producen dos trayectorias que tengan que pasar por un determinado punto, pero con tiempos totalmente diferentes, ambos evolucionarán en la misma magnitud, pero respetando el tiempo de desplazamiento.

2.5.1.6 Variantes con el tiempo.

Son aquellos sistemas que no cumplen con las condiciones de la ecuación anterior, por lo que siempre se encontrarán sujetos a la variable tiempo; como ejemplo se puede mencionar a los sistemas autónomos, ya que todos ellos pertenecen a esta clase de sistemas dinámicos.

2.5.1.7 Lineales.

La linealidad de un determinado sistema se comprueba, si cumple los requerimientos de la siguiente ecuación:

$$\dot{x} = F(ax + by) = aF(x) + bF(y)$$

El cumplimiento de la ecuación se comprueba, si la propiedad de superposición se cumple satisfactoriamente, tal como está expresada; estos sistemas por más complejos que sean, se resuelven de una forma sencilla, mediante la simplificación a la que puede convertirse el problema, aplicando la adición de respuestas, aunque también pueden aplicarse Laplace y Fourier.

2.5.1.8 No lineales.

En este caso en particular, no hay cumplimiento de la ecuación descrita en los sistemas lineales, por lo que el procedimiento de análisis presenta mayores dificultades impidiendo la reducción a esquemas sencillos, lo que trae como consecuencia que los resultados que se obtengan, no tengan la exactitud requerida.

2.6 Formas canónicas

Son técnicas para poder realizar representaciones en lo que concierne al espacio de estado, relacionados específicamente a aquellos sistemas que utilizan señales en tiempo discreto, los cuales pueden representarse mediante la siguiente ecuación general:

$$y(k) + a_1y(k - 1) + \cdots + a_ny(k - n) = b_0u(k) + b_1u(k - 1) + \cdots + b_nu(k - n)$$

Donde k es el muestreo en un determinado instante de tiempo, u(k) es considerada como entrada, y(k) viene a ser la salida; esta ecuación puede ser escrita también, como función de transferencia.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \cdots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + \cdots + a_nz^{-n}}$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0z^n + b_1z^{-1} + \cdots + b_n}{z^n + a_1z^{-1} + \cdots + a_n}$$

Hay diferentes formas canónicas para diversas representaciones, siendo las más conocidas, las siguientes:

2.6.1 Canónica controlable.

Cuando el sistema en estudio es sindicado como controlable, es porque existe la posibilidad de transferencia de la o las variables de estado, desde un lugar arbitrario

considerado como de inicio, hasta otro lugar previsto, teniendo en cuenta un determinado tiempo; las ecuaciones del sistema adoptan la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k+1) \\ x_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [b_n - a_n b_0 : b_{n-1} - a_{n-1} b_0 : \cdots : b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + b_0 u(k)$$

Si por alguna circunstancia se añadirían algunas otras variables de estado, que tengan la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \\ \vdots \\ \hat{x}_n(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix}$$

La nueva forma de la ecuación matricial, sería la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k+1) \\ \hat{x}_2(k+1) \\ \hat{x}_3(k+1) \\ \vdots \\ \hat{x}_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} & -a_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \\ \hat{x}_3(k) \\ \vdots \\ \hat{x}_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} u(k)$$

La ecuación final, tendrá la siguiente forma:

$$y(k) = [b_1 - a_1 b_0 : b_2 - a_2 b_0 : \cdots : b_n - a_n b_0] \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \\ \vdots \\ \hat{x}_n(k) \end{bmatrix} + b_0 u(k)$$

2.6.2 Canónica observable.

La ecuación que la representa es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k+1) \\ x_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -a_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n - a_n b_0 \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \\ \vdots \\ b_2 - a_2 b_0 \\ b_1 - a_1 b_0 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{n-1}(k) \\ x_n(k) \end{bmatrix} + b_0 u(k)$$

Si se altera el orden, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \\ \vdots \\ \hat{x}_n(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix}$$

En definitiva, las ecuaciones tanto de estado como de salida, van a ser convertidas a la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k+1) \\ \hat{x}_2(k+1) \\ \vdots \\ \hat{x}_{n-1}(k+1) \\ \hat{x}_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \\ \vdots \\ \hat{x}_{n-1}(k) \\ \hat{x}_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 - a_1 b_0 \\ b_2 - a_2 b_0 \\ \vdots \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \\ b_n - a_n b_0 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [1 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \\ \vdots \\ \hat{x}_{n-1}(k) \\ \hat{x}_n(k) \end{bmatrix} + b_0 u(k)$$

2.6.3 Canónica diagonal.

Se encuentra relacionada con los polos de la denominada transferencia pulso, en el caso puntual que sean distintos en su totalidad, por lo que la representación es:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + b_0 u(k)$$

2.6.4 Canónica de Jordán.

Esta forma de representación se produce cuando la transferencia pulso, introduce entre sus términos un tipo de polo múltiple en forma de matriz de orden m, mientras que otros polos que la integran son distintos entre sí, resultando la siguiente salida:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_m(k+1) \\ \hline x_{m+1}(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc|cc} p_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & p_{m+1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & p_n \end{array} \right] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_m(k) \\ \hline x_{m+1}(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \hline 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

$$y(k) = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + b_0 u(k)$$

2.7 Solución de las ecuaciones

La ecuación básica para sistemas lineales que además son discretos y que no varían con el tiempo, es:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k)$$

Aplicando transformada z y resolviendo, se tiene:

$$x(k+1) = G(k)x(k) + H(k)u(k)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones se tiene:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \rightarrow \text{estado}$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \rightarrow \text{salida}$$

Resolviendo la ecuación de estado para valores numéricos enteros positivos de k:

$$x(1) = Gx(0) + Hu(0)$$

$$x(2) = Gx(1) + Hu(1) = G^2x(0) + GHu(0) + Hu(1)$$

$$x(3) = Gx(2) + Hu(2) = G^3x(0) + G^2Hu(0) + GHu(1) + Hu(2)$$

Una fórmula general que exprese todo el desarrollo, sería:

$$x(k) = G^k x(0) + \sum_{j=0}^{k-1} G^{k-j-1} Hu(j); \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Entonces la salida tendrá la siguiente forma:

$$y(k) = CG^k x(0) + C \sum_{j=0}^{k-1} G^{k-j-1} Hu(j) + dU(K)$$

Capítulo III

Proyecto: Simulación de un sismómetro mecánico en 3D

3.1 Fundamento

El enfoque de este proyecto se encuentra centrado en conocer la utilidad del sismómetro, en lo que respecta a los movimientos telúricos en general, para ello se plantea la realización del presente proyecto, el cual se implementará con los siguientes programas, MATLAB, Simulink y Vrealm Builder, por consiguiente, ayudara a entender mejor la funcionalidad del sismómetro en los suelos, ya que están ubicados en diferentes puntos estratégicos para determinar el epicentro, la magnitud e intensidad de los sismos.

3.2 Objetivos

Los objetivos para este proyecto, destinado a realizar la simulación de cómo funciona un sismómetro de forma virtual, son:

3.2.1 Objetivo general.

Demostrar el funcionamiento virtual de un sismómetro, utilizando los softwares Matlab, Simulink y Vrealm Builder.

3.2.2 Objetivos específicos.

Son tres los objetivos específicos contemplados: (a) describir conceptos, de sismología y el funcionamiento del sismógrafo; (b) comparar la modelación, del sistema discreto del continuo; y (c) Simulación del sistema, mediante software especializado.

3.3 Diseño del proyecto

El presente proyecto de la simulación de un sismómetro mecánico en 3D, pretende demostrar su funcionamiento en el suelo frente a un sismo, teniendo en cuenta que es un instrumento diseñado especialmente para una función puntual, que es la de poder detectar continuamente las ondas que se generan, como consecuencia de un movimiento sísmico.

La particularidad en este proyecto, es el hecho de utilizar la tecnología electrónica e informática, con la finalidad de crear el entorno virtual apropiado, que tienda a simular el funcionamiento de los sismómetros, ante un eventual movimiento sísmico cuyas características puedan variarse y poder observar resultados diversos en los sismogramas obtenidos, al final se podrá comprender con exactitud la función de los sismógrafos y su importancia en las normas de prevención ante estos desastres naturales.

3.3.1 Sismógrafos.

Son instrumentos ideados exclusivamente para medir intensidades y propagación de ondas sísmicas, producidas por los movimientos que se producen en la tierra, cuyo origen generalmente son debido a la superposición de placas denominadas tectónicas, aunque también hay muchas otras causas que las originan (Moyano, Iñigo y Abadie, 2006).

En la realidad estas ondas se manifiestan en dos direcciones, una horizontal y la otra vertical, entonces habrá dos tipos de sismógrafos, los horizontales y los verticales, ambos construidos en base de la teoría del péndulo.

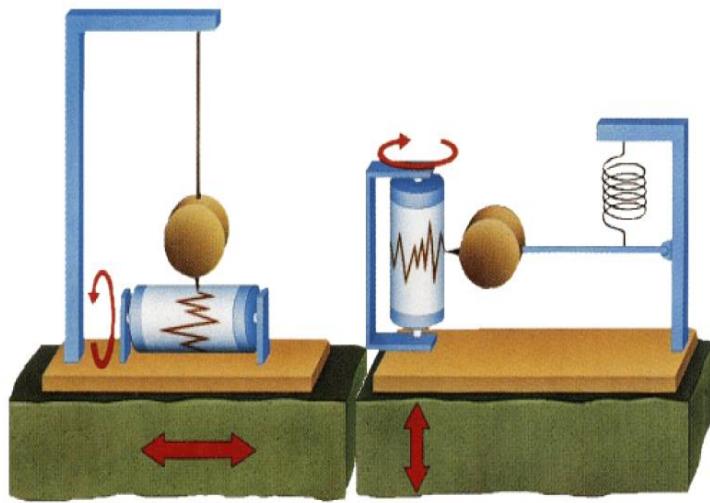


Figura 29. Sismómetros horizontal y vertical. Fuente: Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/3207/1/70043.pdf>

3.3.1.1 Sismogramas.

Con los sismógrafos se obtienen las dos componentes de las ondas sísmicas y la gráfica que se registra en un papel, se denomina sismograma.

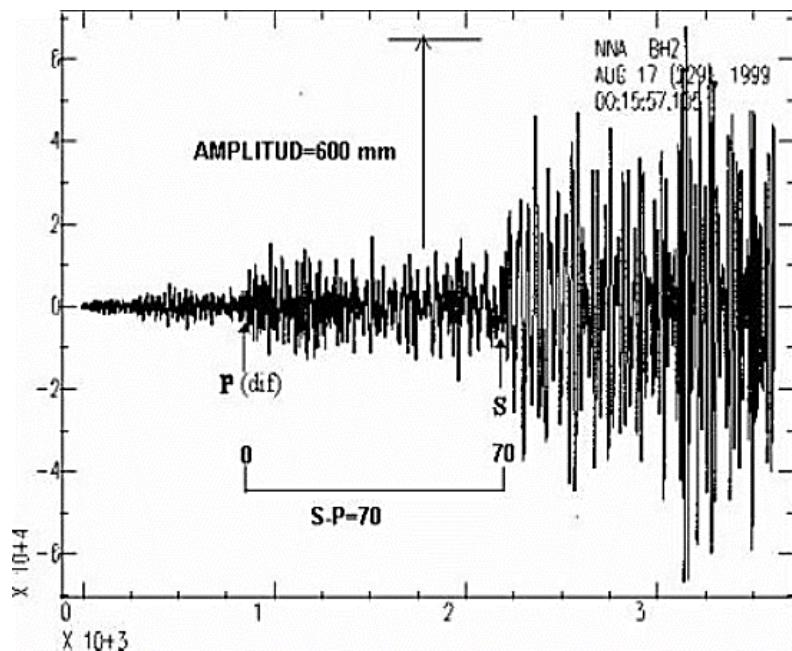


Figura 30. Sismograma horizontal. Fuente: Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/3207/1/70043.pdf>

3.3.1.2 Descripción del sismograma.

Una descripción de la gráfica que se obtiene del sismograma, con los componentes P, S y las ondas superficiales, se muestra en la figura:

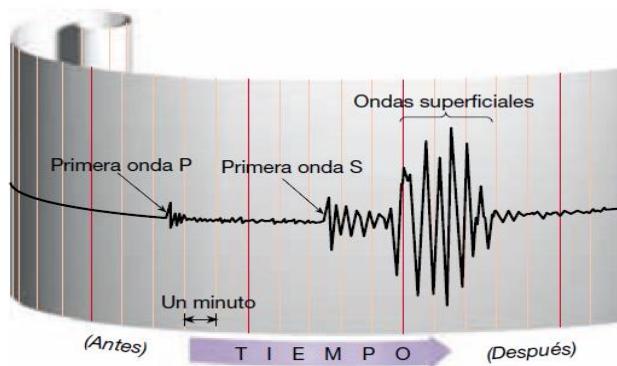


Figura 31. Descripción del Sismograma. Fuente: Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/3207/1/70043.pdf>

3.3.1.3 Colocación de los sismógrafos.

Estos instrumentos pueden ser colocados en forma permanente, en un lugar donde se encuentre realizando un estudio de investigación, debido a la constante ocurrencia de movimientos, por lo que se hace imprescindible la toma constante de información de estas ondas sísmicas, con la finalidad de tomar decisiones correctas, ante poblaciones en inminente peligro.

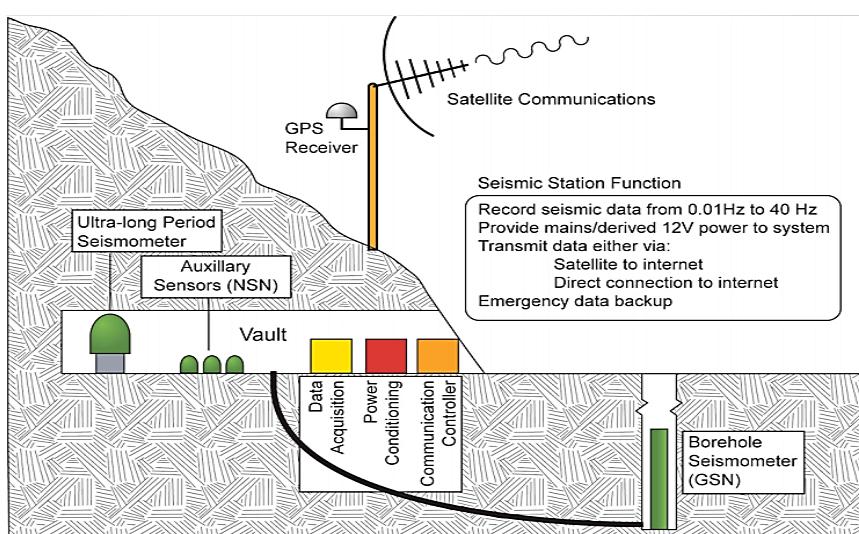


Figura 32. Sismógrafo permanente. Fuente: Recuperado de http://usuarios.geofisica.unam.mx/vala/cursos/Registros_Sismicos_2013-1_files/2.3-Sismografos-20.8.2012.pdf

También se colocan en forma temporal, ante movimientos de poca incidencia y el poco peligro que entraña.

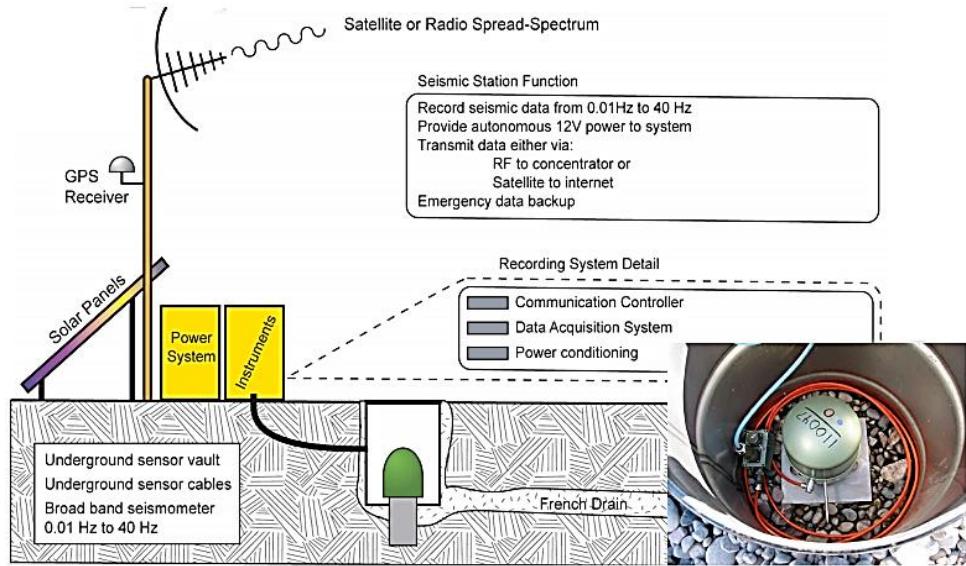


Figura 33. Sismógrafo temporal. Fuente: Recuperado de http://usuarios.geofisica.unam.mx/vala/cursos/Registros_Sismicos_2013-1_files/2.3-Sismografos-20.8.2012.pdf

3.3.2 Sistemas y programas.

Para realizar la simulación en forma precisa y debido a la complejidad del tema, es que es necesario recurrir a sistemas y programas de cómputo adecuados, entre ellos se ha seleccionado a: (a) programa Matlab, (b) programa Simulink, y (c) VRealm builder.

3.3.2.1 Matlab.

Es un sistema ideado para realizar cálculos numéricos de alto nivel, que ofrece un entorno apropiado para obtener un desarrollo de alta integración, conocido generalmente como IDE, que utiliza el lenguaje M diseñado expresamente para su uso y que puede actuar indistintamente con plataformas como Windows, Mac, Linux o Unix.

Entre las características más sobresalientes, se encuentran las siguientes: (a) optimizados para manipular convenientemente, las matrices; (b) pueden implementarse

diversidad de algoritmos, para solucionar problemas complejos; (c) posibilidad de crear interfaces específicas, denominadas de usuario; (d) capacidad de comunicación con dispositivos y lenguajes diversos; (e) uso de herramientas como el Simulink y el Guide.

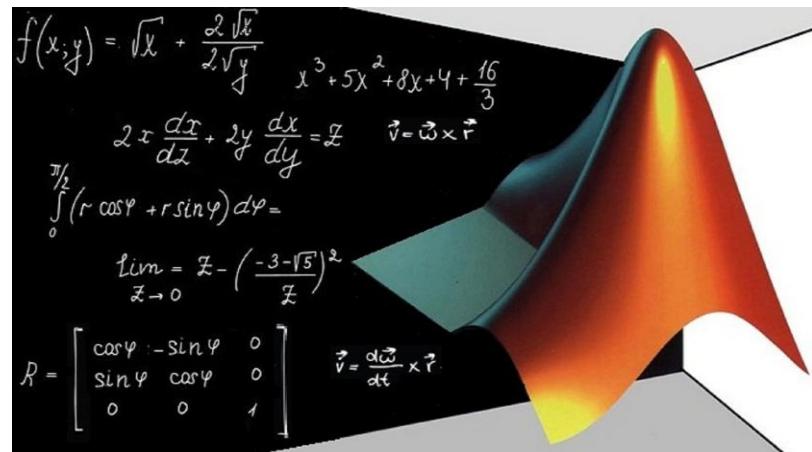


Figura 34. Matlab en cálculos numéricos. Fuente: Recuperado de <https://www.unsa.edu.pe/infounsa/timetable/event/matlab-basico/>

3.3.2.2 Simulink.

También es un entorno de programación concebido para programación visual, que trabaja en forma conjunta con el Matlab, aunque con un lenguaje de más alto nivel en lo que a abstracción se refiere, debido a que es capaz de realizar simulaciones de sistemas basados en modelos matemáticos, por lo que es utilizado para resolver problemas de procesamiento electrónico, en temas relacionados con señales digitales que provienen de especialidades como biomedicina, controles electrónicos, telecomunicaciones, robótica, etc. La jerarquía con respecto a otros programas, se muestra a continuación.

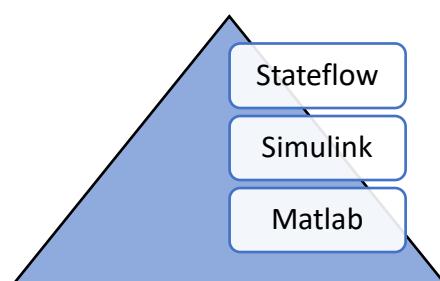


Figura 35. Jerarquía. Fuente: Autoría propia

En la figura que se muestra, se tiene un ejemplo de simulación mediante bloques de un sismómetro, mediante el programa Simulink.

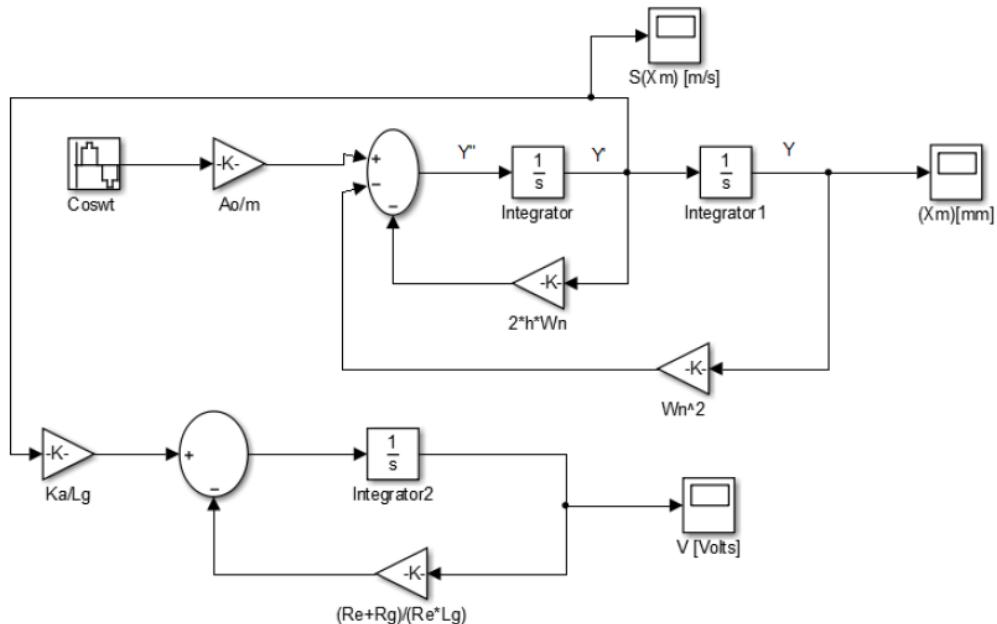


Figura 36. Simulación de un sismómetro en Simulink. Fuente: Restrepo y Ospina, 2013.

Simulink tiene la opción de poder conectarse con partes físicas mediante las interfaces apropiadas, tal como se muestra en la figura.

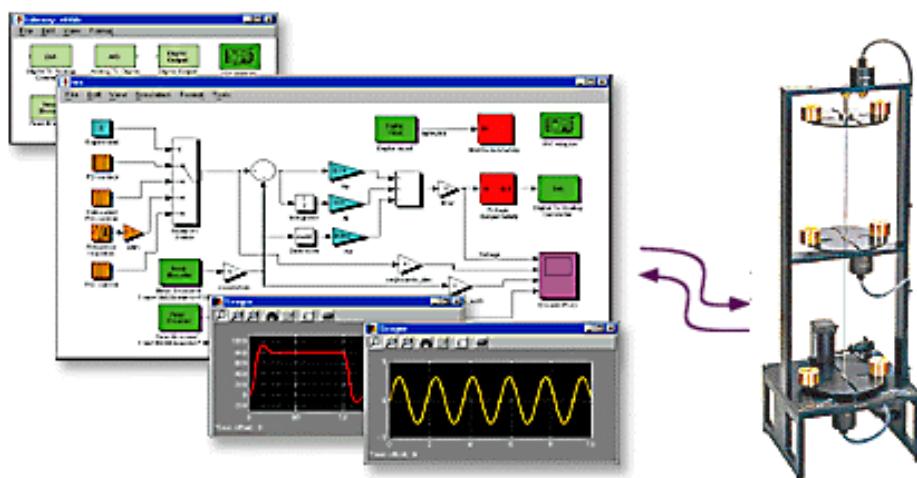


Figura 37. Simulink y una interface para control de hardware. Fuente: Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Simulink#:~:text=Simulink%20es%20un%20entorno%20de,el%20entorno%20de%20programaci%C3%B3n%20Matlab>.

3.3.2.3 VRealm builder.

Es un software que trabaja en forma conjunta con el Matlab y el Simulink, como complemento para el diseño de un mundo virtual, que se relaciona con el proyecto que se está desarrollando, con la finalidad de “darle vida” mediante la simulación en 3D, al objeto principal y los que se encuentran conectados a él y que es motivo de estudio.

Las características de la animación en tres dimensiones, se encuentran supeditadas a tres aspectos básicos: (a) el de traslación, que representa el desplazamiento espacial; (b) rotación, en función de los grados sobre un eje, y; (c) escala, de acuerdo al tamaño que se quiere visualizar. Con todos estos elementos debidamente configurados, se logra una simulación eficiente, los cuales pueden ser variados o controlados utilizando los comandos adecuados de Matlab y Simulink.

En la figura se muestra un ejemplo de formación de un objeto para ser simulado mediante la aplicación de Vrealm builder.

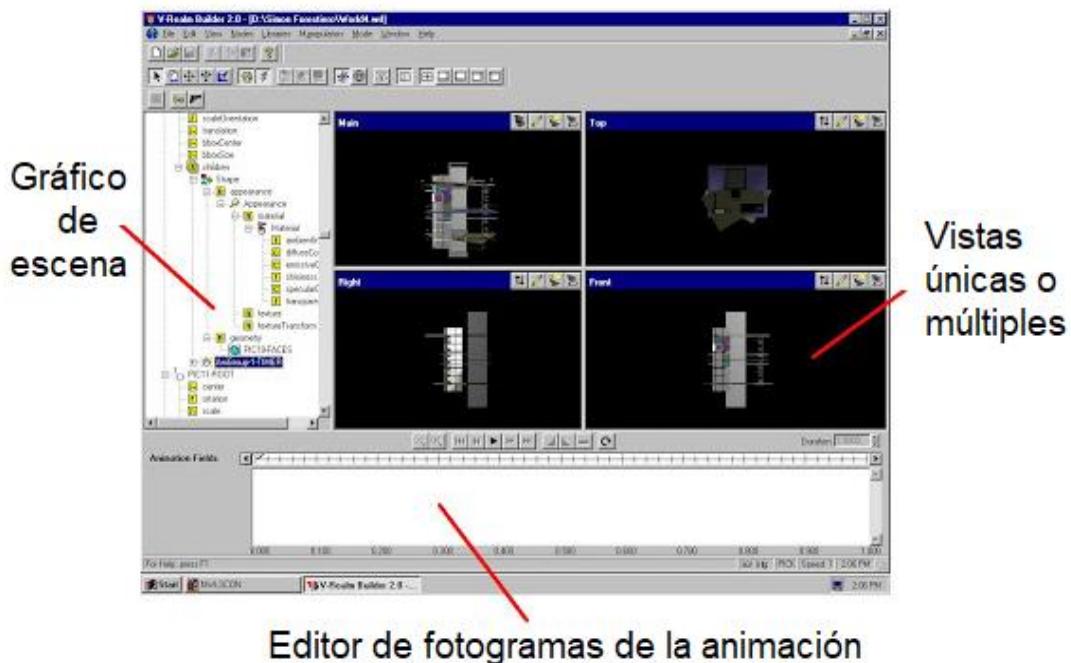


Figura 38. Formando un objeto para simulación con Vrealm build. Fuente: Recuperado de <http://www.agocg.ac.uk/train/vrml2rep/part2/eval4.htm>

3.3.3 Modelo matemático del sismómetro.

Los modelos matemáticos significan representaciones de fenómenos reales, mediante funciones con las cuales es posible obtener resultados numéricos, para una mejor interpretación de los resultados obtenidos; por ejemplo, el modelo matemático para el sismómetro de movimiento horizontal, es el que se muestra en la figura:

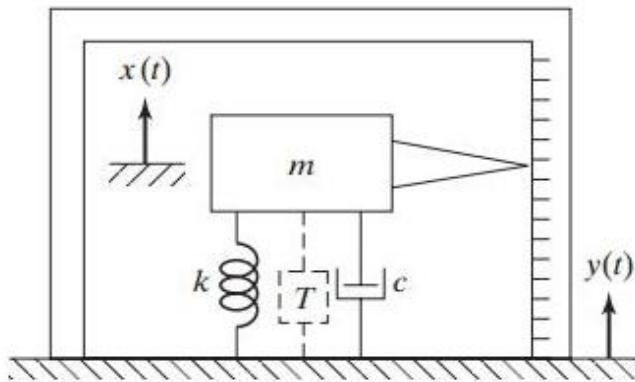


Figura 39. Modelo matemático de un sismómetro horizontal.
Fuente: Restrepo y Ospina, 2013.

Definimos:

$$z(t) = y(t) - x(t)$$

Donde cada coeficiente literal significa lo siguiente: (a) k, representa la constante del resorte, de acuerdo al material que está construido; (b) c, coeficiente de amortiguamiento, y; (c) m, es la masa que tiene el péndulo. Si se aplica la ley de Newton, se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$my'' = -kz - cz'$$

Para el modelado en espacio de estados, se definen las siguientes igualdades:

$$x_1 = z ; \quad \dot{x}_1 = x_2$$

Combinando y ordenando las ecuaciones, se tiene:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = Ax + Bx$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix}$$

$$y = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + [0] \cdot u(t)$$

De donde se obtiene las siguientes matrices:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Para: $m = k = c = 1$; con el comando (c2dm) en Matlab, encontramos las matrices

en tiempo discreto:

$$F = \begin{bmatrix} 0.9952 & 0.0950 \\ -0.0950 & 0.9002 \end{bmatrix}$$

$$H = [1 \quad 0]$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ -0.00481 \end{bmatrix}$$

$$I = [0]$$

Los valores de las matrices se pasan a los bloques del Simulink, para darle funcionalidades:

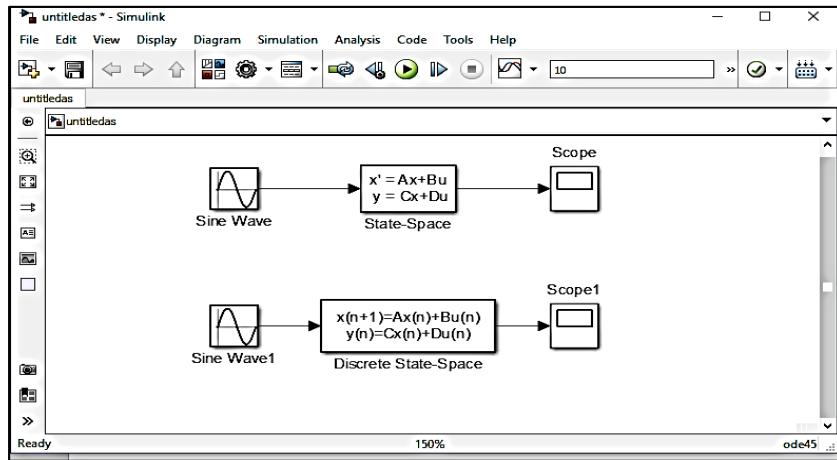


Figura 40. Armando los bloques con Simulink. Fuente: Autoría propia.

Se van adicionando valores a cada bloque, que servirán para una simulación correcta.

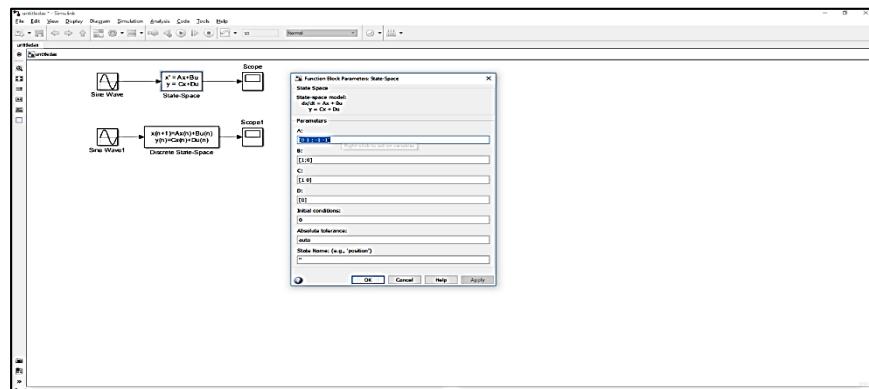


Figura 41. Insertando valores en los bloques con Simulink. Fuente: Autoría propia.

Se termina de hacer la configuración de los datos pertinentes, bloque por bloque.

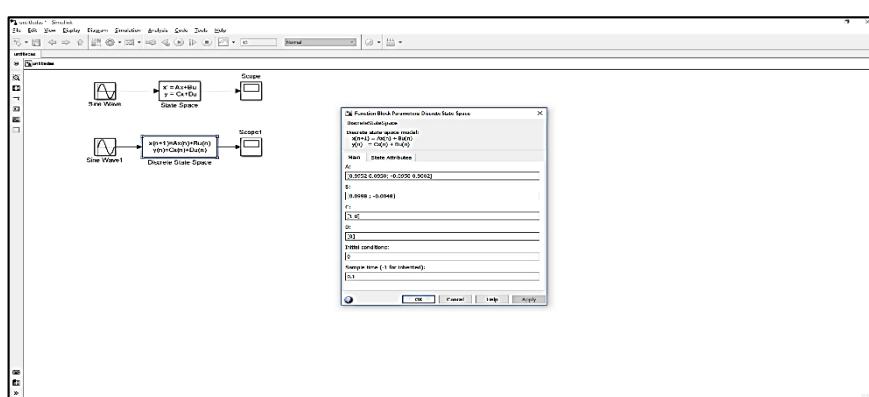


Figura 42. Valores configurados con Simulink. Fuente: Autoría propia.

Para demostrar el resultado, se visualiza las dos señales en tiempo continuo y tiempo discreto.

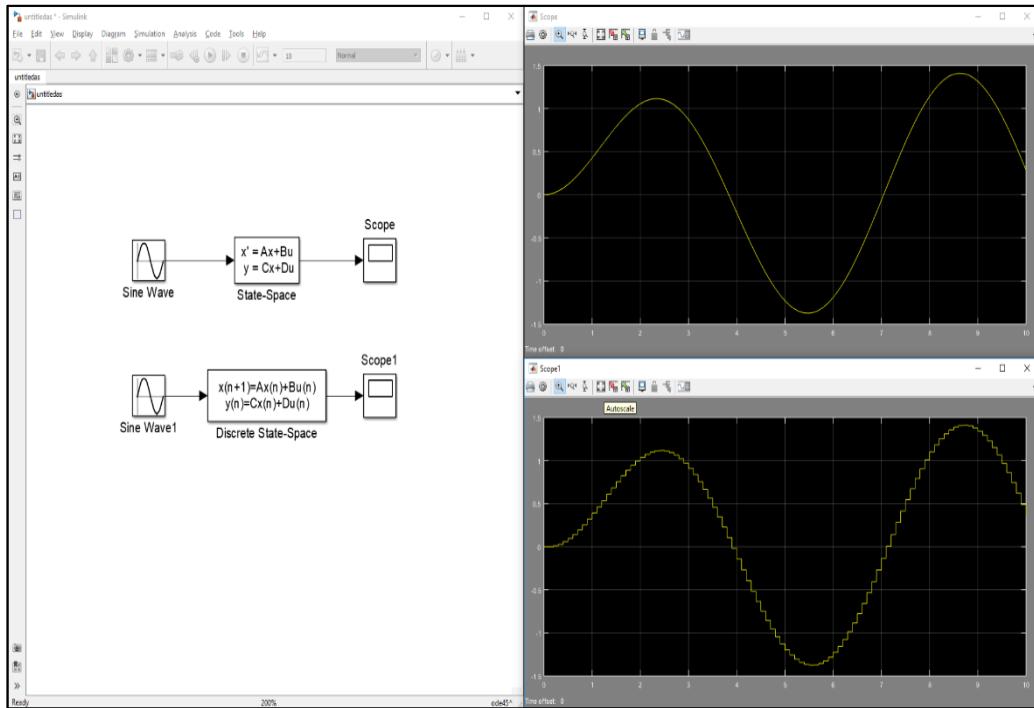


Figura 43. Visualización de señales. Fuente: Autoría propia.

3.4 Planificación

En esta parte del trabajo, se realizan las siguientes actividades que conlleven al cumplimiento de los objetivos, contemplados en el proyecto.

3.4.1 Actividades planificadas en el tiempo.

El cronograma confeccionado para la realización antelada, del total de actividades que son requeridas para cumplir con el íntegro del proyecto, se describen siguiendo un orden cronológico que va desde la selección del tema, hasta la entrega del informe en la que hay una descripción total del proyecto, lo que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1
Actividades de planificación

Actividades	2018		Abril		Mayo	
	3°Sem	4°Sem	1°Sem	2°Sem		
a. Selección del tema,			X			
b. diseño del proyecto,			X			
c. selección de programas a utilizar			X			
d. construir base teórica del tema,				X		
e. elaborar programa en Matlab,				X		
f. aplicar el programa Simulink,				X		
g. simular en 3D con Vrealm build,				X		
h. verificar resultados y control de calidad,					X	
i. elaborar informe del proyecto terminado.						X

Nota: Programación del proyecto. Fuente: Autoría propia

3.4.2 Relación de costos.

Los gastos que se han generado como consecuencia de realizar el presente trabajo de investigación, se resumen en forma ordenada en la siguiente tabla.

Tabla 2
Costos del proyecto

Nº	Descripción	Costo en Soles
1	Equipo de cómputo	80
2	Impresión del trabajo	60
3	Empastado de tres juegos	90
4	Asesoría	400
	TOTAL	630

Nota: Relación de gastos complementarios. Fuente: Autoría propia

3.4.3 Costo total.

Realizando la suma de todos los costos empleados para llevar a cabo el proyecto, se tiene la suma de: Seiscientos treinta soles, (S/. 630,00).

Costo total= S/. 630,00

3.5 Elaboración del proyecto

Los pasos consecutivos a seguir en la elaboración del proyecto, para efectuar la simulación virtual de un sismómetro, son:

- Ingresar a Matlab,

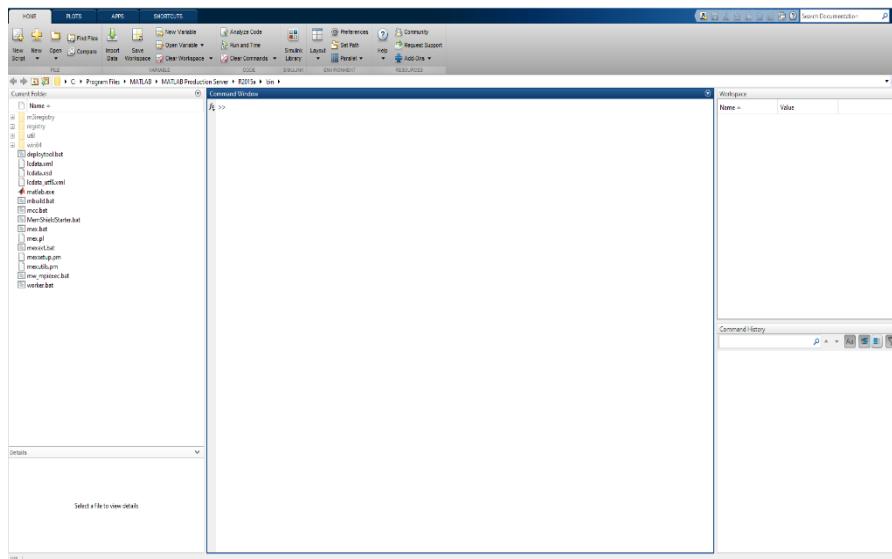


Figura 44. Página de inicio de Matlab. Fuente: Autoría propia.

- se asignan valores a las variables, en la ventana de comandos,

$$m1=1; m2=10; g=10; Bt=1; Br=0.1; L=0.5$$

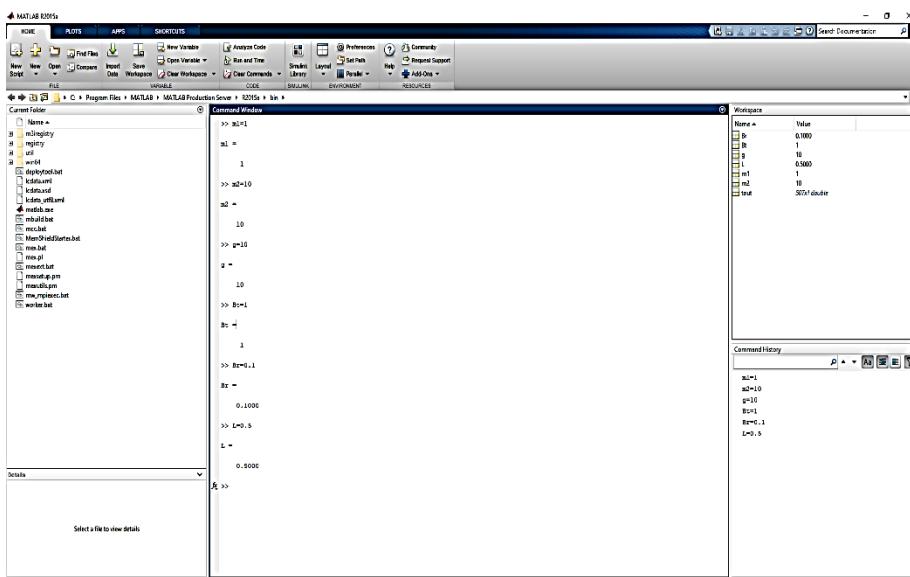


Figura 45. Asignación de valores a las variables. Fuente: Autoría propia.

- c. se realiza el diagrama en bloques con el Simulink, basado en los valores que se les ha asignado a las variables, mediante el Matlab,

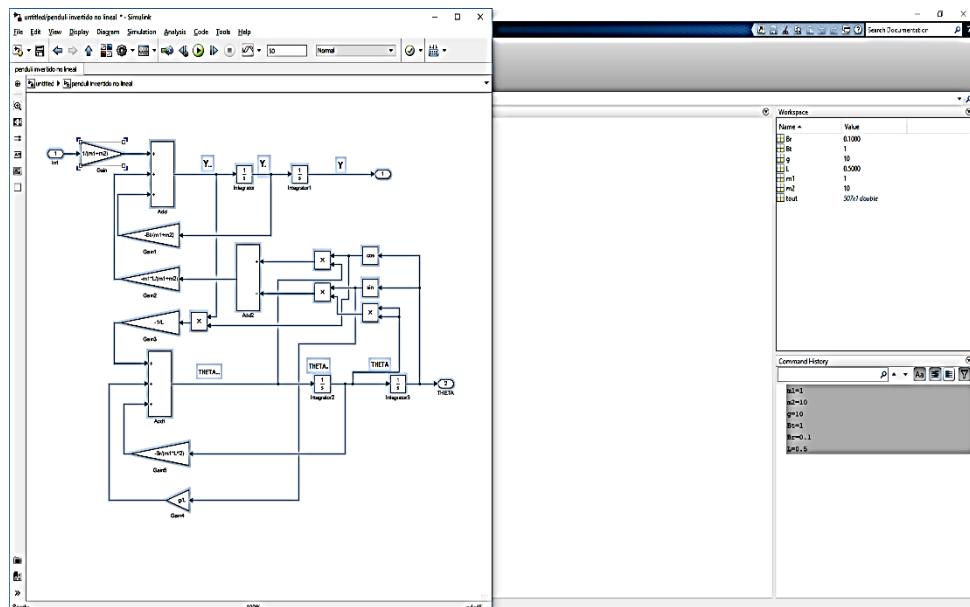


Figura 46. Diagrama en bloques con Simulink. Fuente: Autoría propia.

- d. se comprime el diagrama en un subsistema, en el mismo programa Simulink, el cual queda de la siguiente manera,

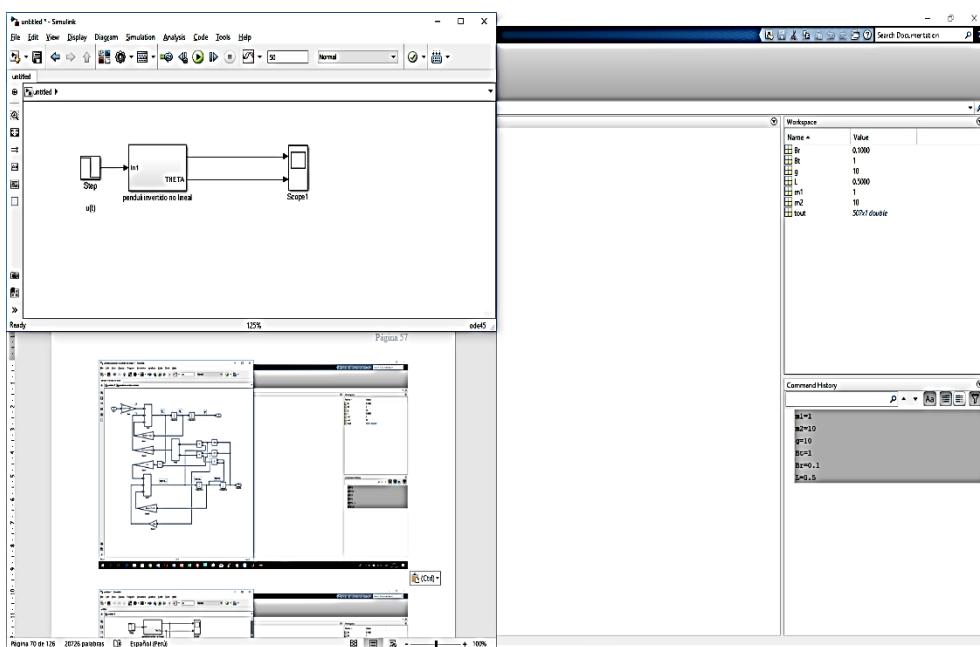


Figura 47. Diagrama comprimido. Fuente: Autoría propia.

- e. se procede a la simulación en 3D mediante el programa VREALM BUILDER 2.0, interfaz de MATLAB, siendo la ruta SIMULINK BROWSER, opción Simulink 3D animation, bloque VR Sink,

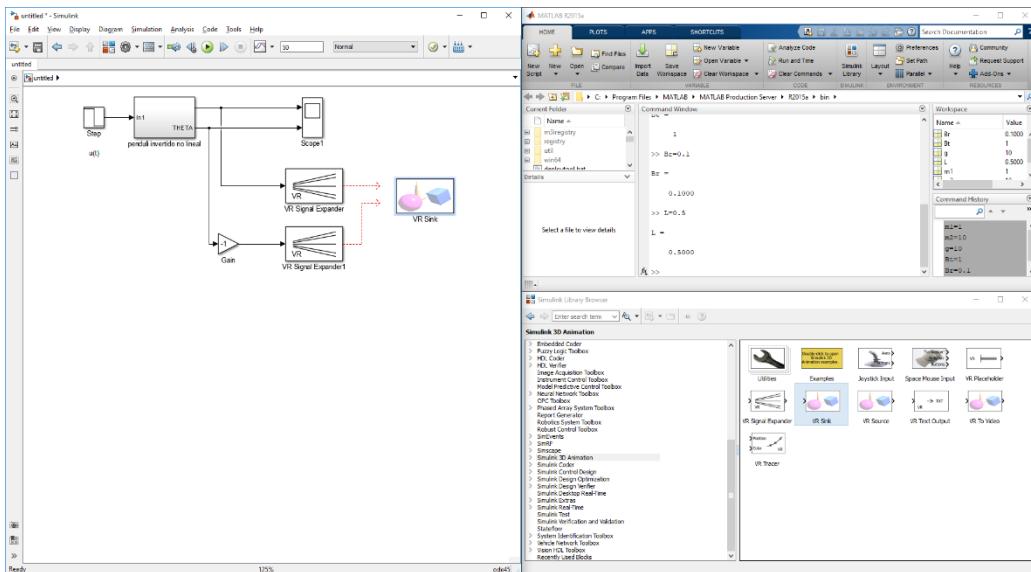


Figura 48. Inicio de simulación. Fuente: Autoría propia.

- f. se abre el simulador Vrealm builder 2.0,

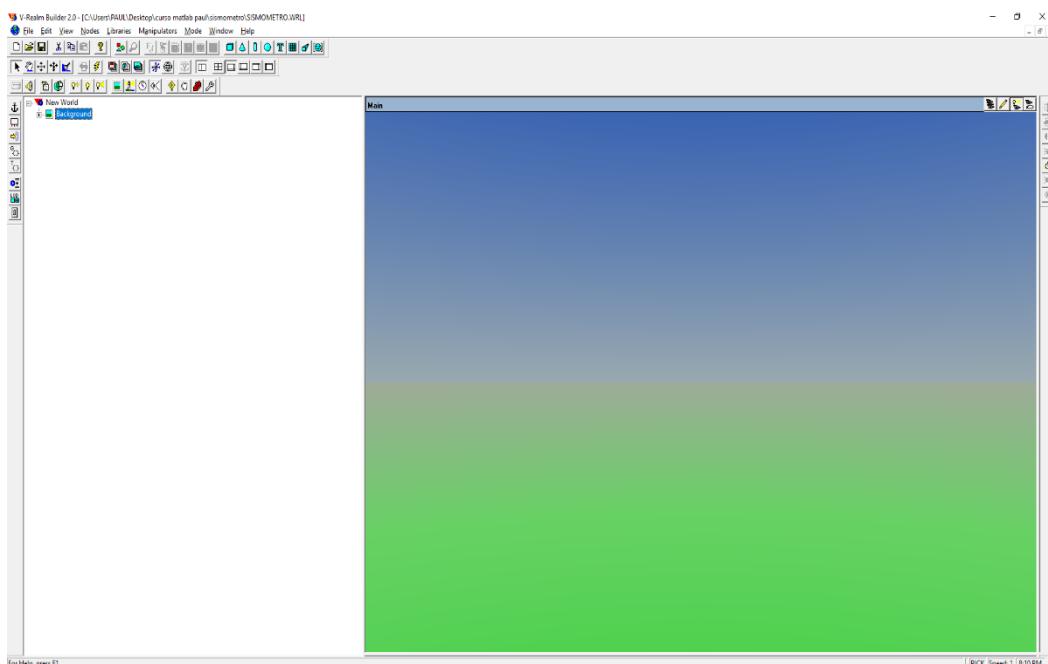


Figura 49. Inicio del simulador Vrealm builder 2.0. Fuente: Autoría propia.

g. se crea bloques de simulación,

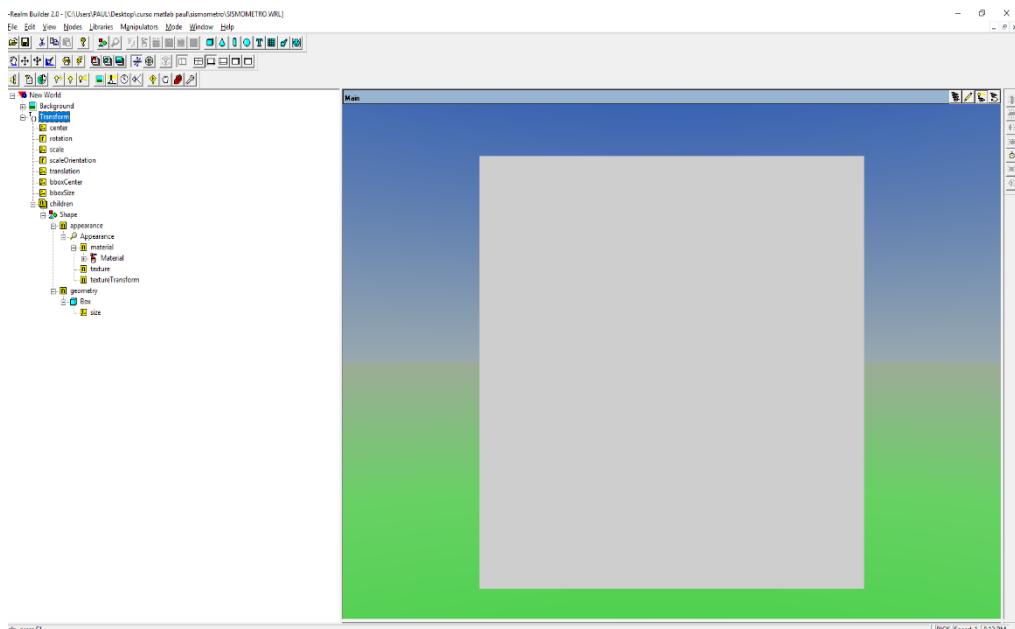


Figura 50. Iniciando la creación de bloques. Fuente: Autoría

h. simulación de estos bloques, son modificables en toda su dimensión,

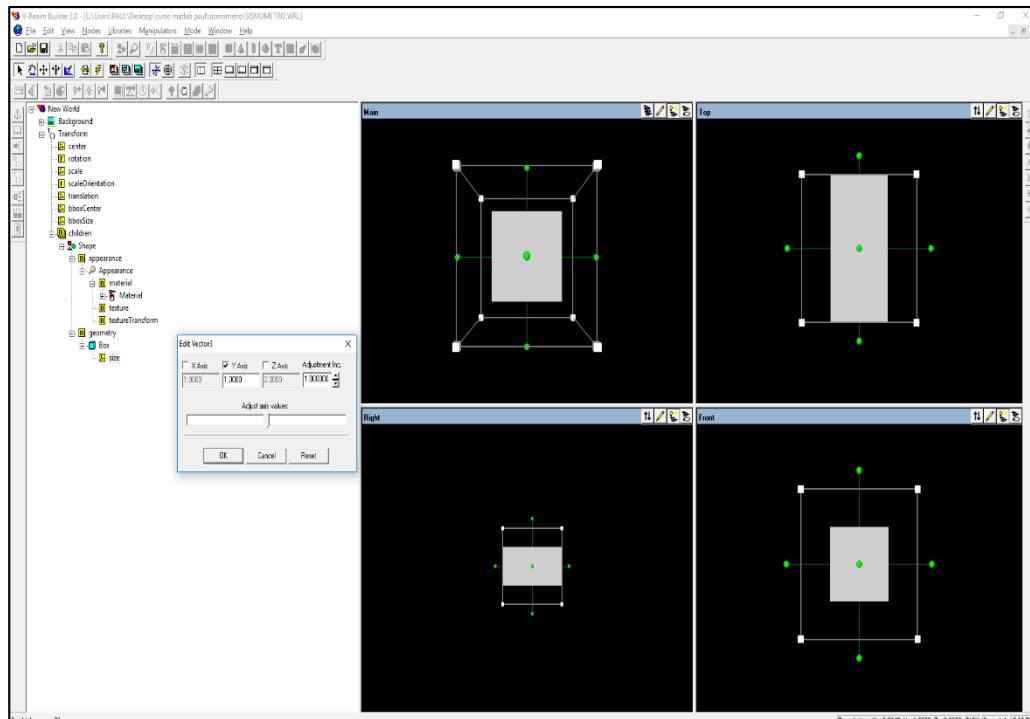


Figura 51. Asignar dimensiones a los bloques. Fuente: Autoría propia.

- i. el resultado es el siguiente,

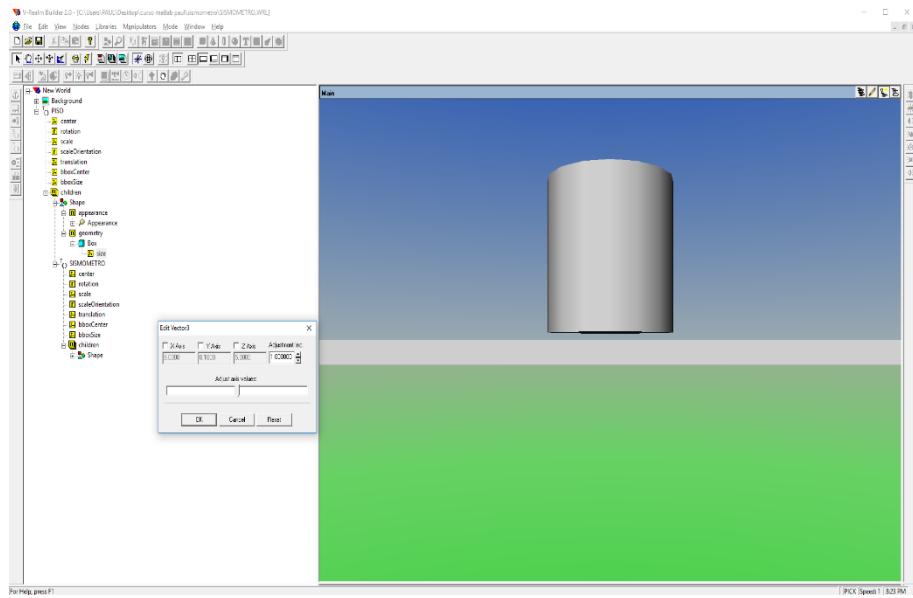


Figura 52. Ejemplo de bloque dimensionado. Fuente: Autoría propia.

- j. para crear enlace se hace doble click al bloque VR Sink, luego la opción BROWSE, le das la dirección del archivo de tu creación o animación en 3D y te aparecerá el enlace,

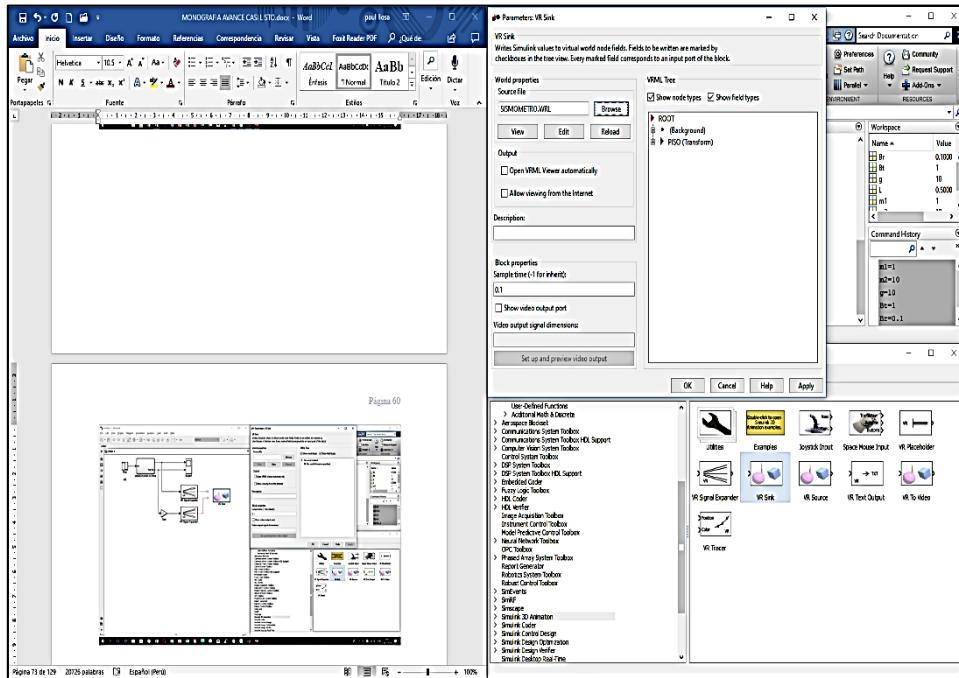


Figura 53. Creación de enlace. Fuente: Autoría propia.

- k. luego ir al cuadro VRML TREE donde se verán los rotulados de la creación, al darle click se desglosará y se le da la indicación de que función tendrá cada bloque creado,

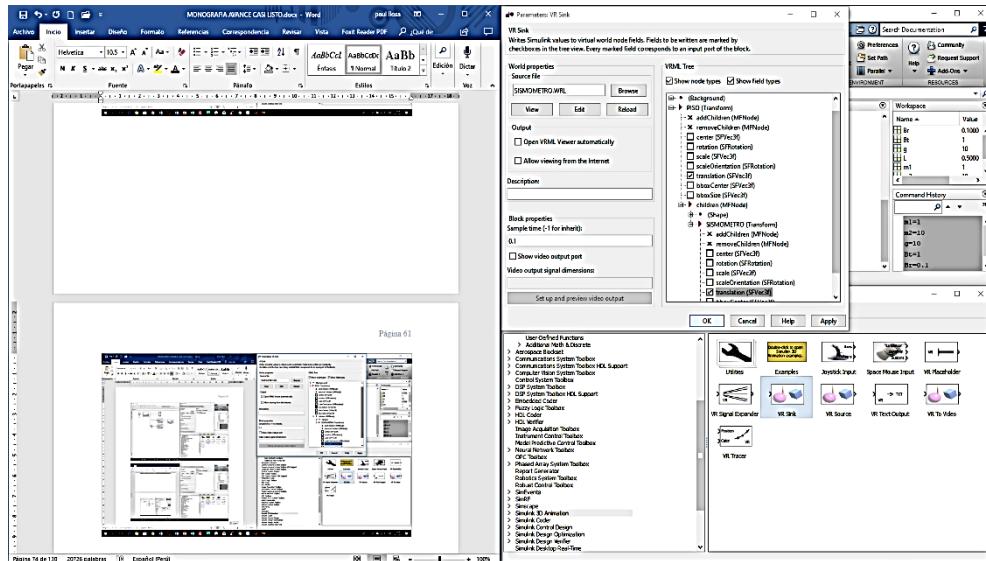


Figura 54. Asignar funciones a cada bloque. Fuente: Autoría propia.

- l. al final quedará de la siguiente forma.

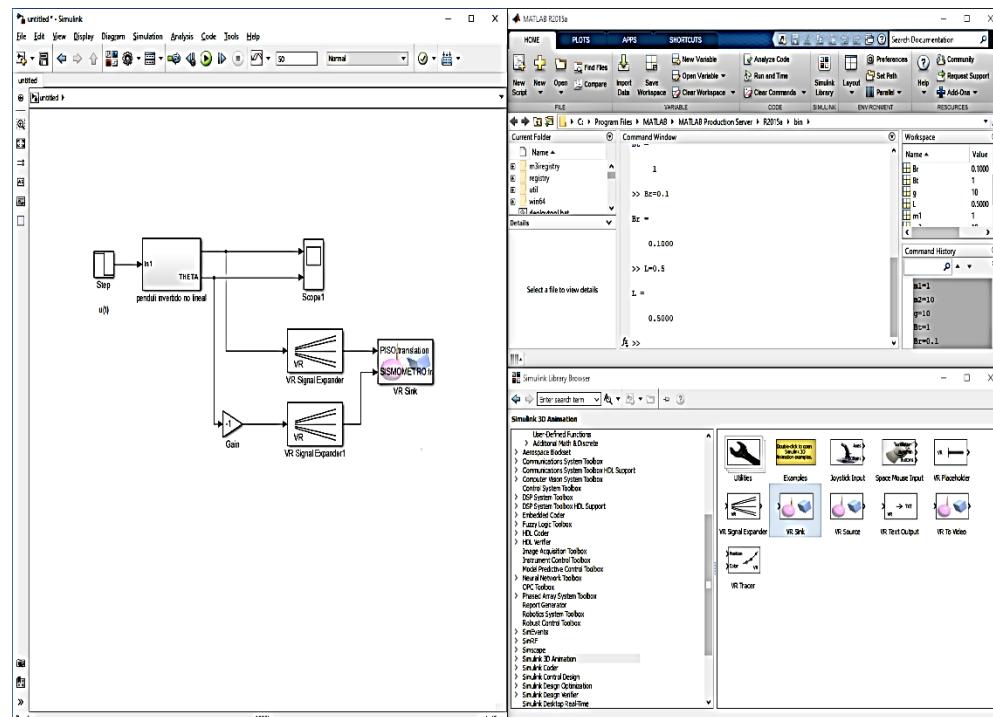


Figura 55. Funciones asignadas. Fuente: Autoría propia.

3.6 Prueba del proyecto

Una vez que se ha terminado de realizar las actividades requeridas para efectuar la simulación de un movimiento sísmico y ser detectado por un sismómetro, con la finalidad de poder cuantificar la magnitud que le corresponda, así como describir la forma de ondas que se han generado como consecuencia de este movimiento, es que se ha procedido a la realización de la prueba y constatar que se cumplan todos los requerimientos establecidos en la programación de los softwares utilizados.

Durante la prueba se ha podido verificar que las instrucciones brindadas al Matlab como al Simulink, cumplen con las especificaciones que se han requerido al inicio del proyecto, por lo que al aplicar el VRealm build se han obtenido la gráfica correspondiente, en 3D acorde a los parámetros que le fueron asignados, para tal fin.

3.7 Evaluación

Habiéndose realizado la prueba de funcionamiento de la simulación de un sismómetro en forma eficiente, además de haberse comprobado que cumple con todas las especificaciones que se han requerido para este proyecto, así como haberse obtenido los resultados en imágenes 3D, que concuerdan con los parámetros que se establecieron en las instrucciones, es que se concluye, que se ha cumplido a cabalidad con cada uno de los objetivos trazados en este proyecto.

Aplicación didáctica

Sesión de aprendizaje

1.1 Datos informativos

- 1.1.1 Especialidad : Electrónica e informática
- 1.1.2 Curso : Electrónica industrial
- 1.1.3 Créditos : 05
- 1.1.4 Docente : Llosa Rodríguez, Paul Michael
- 1.1.5 Duración : 45 min.
- 1.1.6 Fecha : 11 / 07 / 2018

1.2 Tema

Simulación del sismómetro en 3D.

1.3 Objetivos

- 1.3.1 Aprender los conceptos básicos de sismología.
- 1.3.2 Analizar e interpretar la importancia del sismómetro.
- 1.3.3 Conocer la función del sismógrafo en el suelo mediante una simulación de un sismo.
- 1.3.4 Aprender los conceptos básicos de los simuladores MATLAB, Simulink y VRealm Builder 2.0

1.4 Metodología

- 1.4.1 Interactivo.
- 1.4.2 Demostrativo.

1.5 Materiales y equipos

- 1.5.1 Hoja de información

1.5.2 Hoja de practica

1.5.3 Software (MATLAB, Simulink y VRealm Builder).

1.5.4 Proyector multimedia

1.5.5 Computadoras personales con red

1.6 Procedimiento

Inicio (10 minutos)	<ul style="list-style-type: none"> a. El docente saluda y da la bienvenida a los estudiantes, b. el docente formula interrogantes, c. crea una lluvia de ideas organizándolas de acuerdo a la importancia del sismómetro en la tierra.
Desarrollo (25 minutos)	<ul style="list-style-type: none"> a. Se entrega a los estudiantes una hoja de información, b. se explica en detalle el tema a tratar, c. el profesor resuelve las interrogantes de los alumnos, apoyado del proyector multimedia.
Cierre (10 minutos)	<p>El docente realiza la metacognición, mediante las siguientes interrogantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. ¿Qué dificultades se presentaron al realizar el trabajo en clase?, b. ¿cómo te sentiste realizando el trabajo en clase?, c. ¿qué aprendimos hoy?, d. ¿para qué nos sirve lo aprendido?

1.7 Demostración

1.7.1 El proyecto que se presentará es una simulación de un sismómetro

(MATLAB, Simulink y V.Realm Builder 2.0).

1.7.2 Se visualizará de manera directa la correcta programación, lo cual se podrá observar mediante el simulador.

1.7.3 También se podrá modificar, la velocidad de desplazamiento.

1.8 Evaluación

La evaluación es constante, se tomará en cuenta el desarrollo de la práctica y el cuestionario de la hoja de información.

Hoja de información

Simulación del sismómetro en 3D

1.1 Objetivos

- 1.1.1 Aprender los conceptos básicos de sismología.
- 1.1.2 Analizar e interpretar la importancia del sismómetro.
- 1.1.3 Conocer la función del sismómetro en el suelo mediante una simulación de un sismo.
- 1.1.4 Aprender los conceptos básicos de los simuladores MATLAB, Simulink y VRealm Builder 2.0

1.2 Sismología

Parte de la geofísica, que tiene por objetivo realizar un estudio profundo acerca de las causas que originan movimientos, que se producen tanto en las profundidades como en la superficie terrestre, a los que generalmente se les conoce como temblores si son de poca intensidad y terremotos cuando la intensidad se incrementa considerablemente y causa daños materiales y físicos a las personas. También estudia los tipos de ondas que se producen, con lo que es posible determinar el lugar exacto de donde provienen tales vibraciones.



Figura 56. Vectores de Sismógrafo. Fuente: Recuperado de <https://sp.depositphotos.com/vector-images/sismograf.html?offset=100>

1.3 Sismos

Son movimientos de intensidad y duración variada, que se manifiestan en la superficie de la tierra, pero el origen es en su interior causados en la mayoría de los casos por desplazamientos que se producen cada cierto tiempo, de placas tectónicas que se sobreponen una con otra, creando liberación de energía y las consiguientes vibraciones que percibimos en el suelo terrestre. Hay que considerar que, a mayor duración del movimiento, los daños causados pueden ser mayores, inclusive la vida humana corre peligro.



Figura 57. Efectos de Sismos. Fuente: Gutiérrez, R. (2019).

1.4 Ondas Sísmicas

Se encuentran definidas, como movimientos que son percibidos en el suelo terrestre, como consecuencia de energía que se libera desde un punto referencial, que recibe el nombre de hipocentro. Se dividen en: (a) ondas internas, (b) ondas superficiales.

1.4.1 Internas.

Son de dos tipos: las ondas P (primarias) que son compresivas y que se caracterizan por que, durante su trayectoria, producen la dilatación de los materiales rocosos; tienen la propiedad de atravesar todo el planeta.



Figura 58. Ondas compresionales P. Fuente: Recuperado de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

También se tiene a las ondas S (secundarias) que son transversales, desplazándose perpendicularmente a su trayectoria; a diferencia de la anterior, no atraviesan el núcleo de la tierra.



Figura 59. Ondas transversales S. Fuente: Recuperado de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

1.4.2 Superficiales.

Tienen dos tipos de ondas; las de tipo R (Rayleigh), cuya trayectoria es elíptica y las de tipo L (Love), se le considera como onda cizalla, porque el plano vibratorio es normal al del rayo.

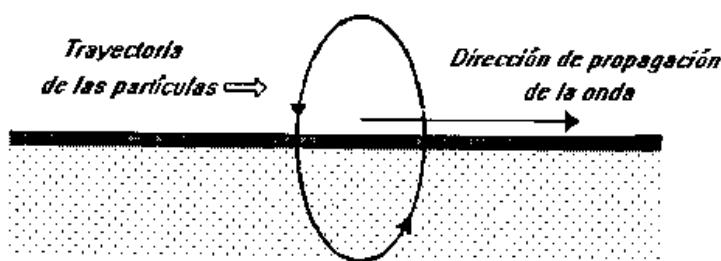


Figura 60. Ondas R, Rayleigh. Fuente: Recuperado de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

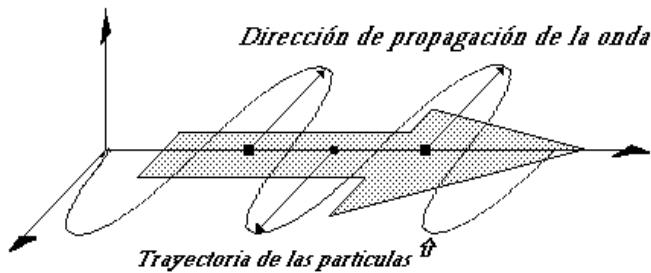


Figura 61. Ondas de Love. Fuente: Recuperado de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

Estas ondas L, son las responsables de causar daños en la superficie, como hendiduras y grandes fisuras.



Figura 62. Cortes en la tierra. Fuente: Recuperado de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

La representación gráfica de todas estas ondas, desde el epicentro hasta la superficie, es la que se muestra.

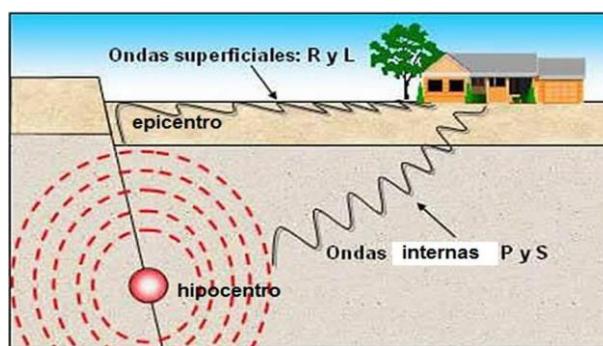


Figura 63. Tipos de ondas. Fuente: Recuperado de <https://post.geoxnet.com/glossary/ondas-sismicas/>

1.5 Velocidad de las ondas

Existe una relación entre las diversas ondas vistas en el acápite anterior, aunque hay una cierta limitación entre las ondas R y L, debido a que se encuentra supeditada a diversos factores, principalmente a que no tienen la misma velocidad de desplazamiento. Las velocidades en general dependen básicamente del medio por el cual se tienen que desplazar, dependiendo del grado de densidad de las rocas por las cuales tiene que transitar.

Las ondas P son las causantes del ruido sordo que se produce cuando hay sismo, el incremento de este ruido se debe a las ondas S y posteriormente cuando la tierra retumba, se debe a las ondas R y L.

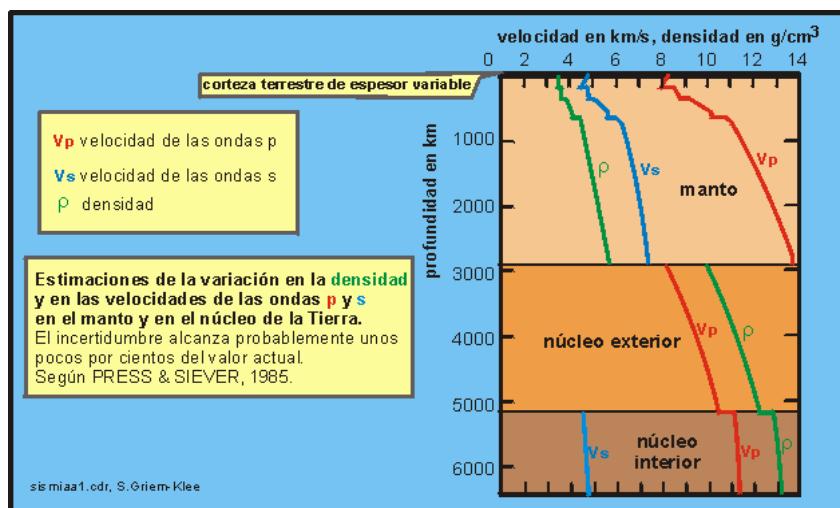


Figura 64. Velocidades de las ondas P, S, R y L. Fuente: Recuperado de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html

1.6 Magnitud e intensidad

La magnitud de los sismos se encuentra reflejada, por la cuantificación de la energía que se ha sido liberada mientras se ha producido el fenómeno, determinada por el tamaño del área que ha sufrido daño físico, denominadas con escala que se inicia con la letra M y que son logarítmicas, ejemplo; M5, M6, etc.

La intensidad son los efectos que produce el sismo, pero estimados en forma cualitativa, comprendiendo los siguientes criterios, (a) la forma como es percibido en la población, (b) efectos producidos en las casas y edificios y (c) afectación a la tierra y el impacto al medioambiente. Además, como los efectos se encuentran ligados a la cercanía del lugar de origen del sismo, entonces la intensidad también variará de acuerdo a este factor.

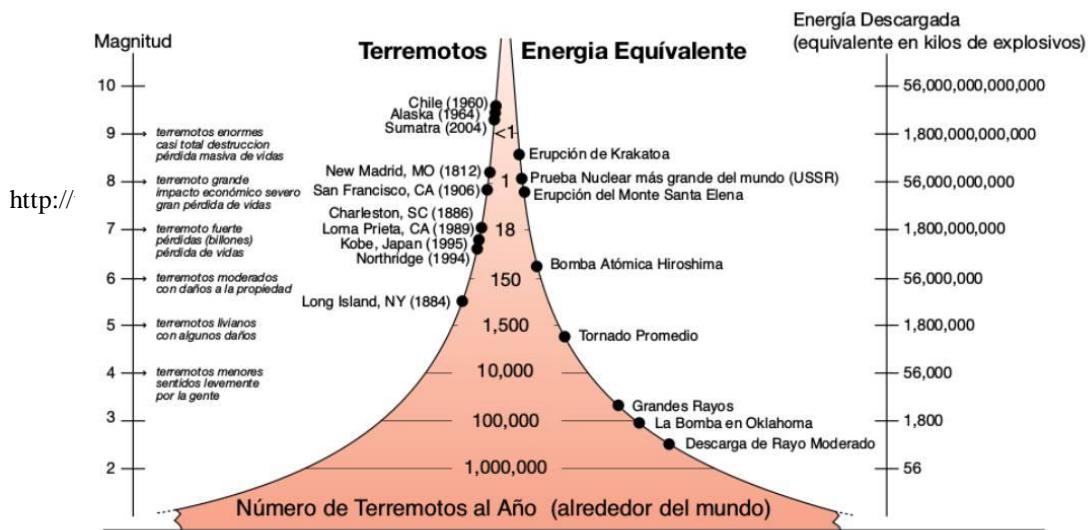


Figura 65. Magnitud e intensidad de los sismos. Fuente: Recuperado de <http://www.geologiadesegovia.info/terremotos-magnitud-intensidad/>

1.7 Sismómetro

Instrumento ideado para el registro continuado de aquellas ondas que sean derivadas de cualquier sismo producido; estas ondas pueden tener direccionalidad horizontal y vertical, por lo que se hace necesario detectar ambos movimientos, siendo motivo para utilizar ambos dispositivos de detección y tener información completa acerca de la magnitud real del sismo.

El desarrollo tecnológico ha hecho posible el diseño y elaboración de estos instrumentos, integrando ambos dispositivos en uno y la obtención de alta calidad del gráfico, para una mejor interpretación del mismo.

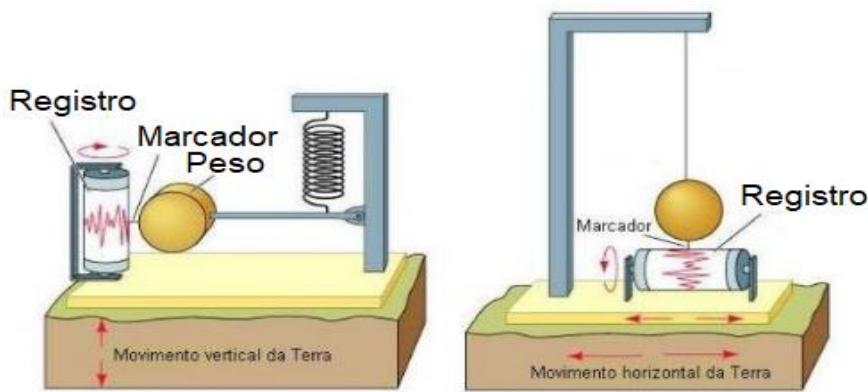


Figura 66. Sismógrafos horizontal y vertical. Fuente: Recuperado de <https://www.pinterest.es/pin/254946028891193752/>

1.8 Simuladores

Son herramientas que propician efectos muy parecidos a la realidad, ya sea utilizando medios mecánicos o constituyendo un medio virtual mediante el uso de la tecnología electrónica e informática, como sucede con el Matlab, el Simulink y el Vrealm Builder, que se detallarán a continuación.

1.8.1 Matlab.

Son las siglas de laboratorio matricial o de matrices, que corresponden a un sistema IDE, que realiza operaciones numéricas variadas y que se programa en función de un lenguaje propio (M), pudiendo ser utilizada en diferentes plataformas o sistemas operativos, como Windows, Linux, etc.

1.8.1.1 Características.

Las características de este programa son variadas, siendo las más sobresalientes las siguientes: (a) el lenguaje utilizado para la programación, en lo que respecta a la realización de cálculos numéricos complejos, es de nivel denominado alto; (b) gestión eficiente de elementos de interacción, como archivos con formatos diversos, códigos de acceso y tratamiento de datos; (c) herramientas variadas de interacción, para explorar,

diseñar y resolver problemas; (d) contiene funciones para ser aplicadas, en diversos campos de las matemáticas; (e) funciones diversas, para realizar múltiples gráficas 2D y 3D; (f) opción para la creación de interfaces personalizadas; (g) integración con otros lenguajes, como Java, Excel, etc.

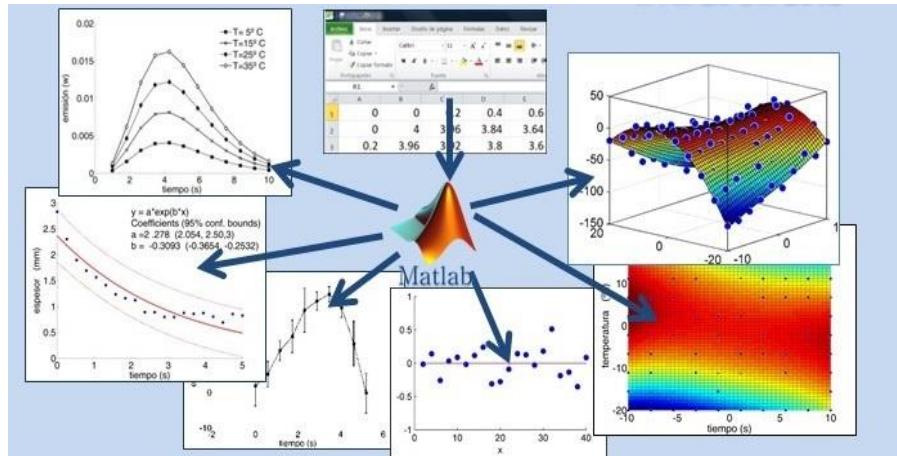


Figura 67. Características de Matlab. Fuente: Recuperado de https://www.upct.es/destacados/cdestacados.php?c=6&ubicacion=general&id_buscar=11963

1.8.2 Simulink.

Representa la caja de herramientas que es utilizada por Matlab para poder realizar simulaciones de diversa índole, modelar en base a funciones matemáticas, sean lineales o no que pueden ser en base a tiempo continuo o discreto y la realización de análisis concernientes a los sistemas dinámicos.

También tiene como beneficio o ventaja, el permitir el uso de interfaces con las cuales se obtienen gráficas sencillas; cuenta con una vasta librería de elementos, que comprenden datos variados, operadores matemáticos de cálculo diferencial e integral, posibilidad de observar resultados; otra ventaja adicional, es que puede efectuar otras funciones, utilizando la S-function, que se verá a continuación.

1.8.3 S-function.

Es un bloque que tiene por finalidad, ampliar convenientemente las funciones básicas con las que se inicia Simulink, de acuerdo al requerimiento en particular en la que se encuentre trabajando y tratando de simular; cuenta con la facilidad adicional de poder adaptar fácilmente archivos con extensión “dll”, al lenguaje utilizado por simulink.

Estas nuevas funciones pueden ser escritas en otro lenguaje como es el C, o en el mismo lenguaje de Matlab, pero para darle el uso requerido se requiere que se compile en archivo con extensión MEX. Si las instrucciones se encuentran en lenguaje C, estas deben contener tres partes que se ejecutan obligatoriamente, las cuales son: (a) inicialización, (b) proceso y (c) finalización. Algunas de las funciones utilizadas comúnmente, son las que se muestran en la tabla.

Tabla 3
Funciones de las S-function

Función	Objetivo
mdlInitializeSizes	Establece cantidad de puertos in/out pertenecientes al bloque y sus dimensiones.
mInitializeSamleTime	Determina el tiempo que debe ser actualizado, los valores in/out al bloque.
mdlStart	Ejecución solo al inicio de simulación.
mdlOutputs	Determina salidas por actualización.
mdlUpdate	Reconsidera estados intermedios cada Vez que se actualice.
mdlTerminate	Ejecución al finalizar simulación.

Nota: Funciones ejecutadas de las S-function. Fuente: Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/11477/fichero/Memoria%252F03.pdf>

En la siguiente figura, se muestran las partes que debe tener la S-function para su funcionamiento:

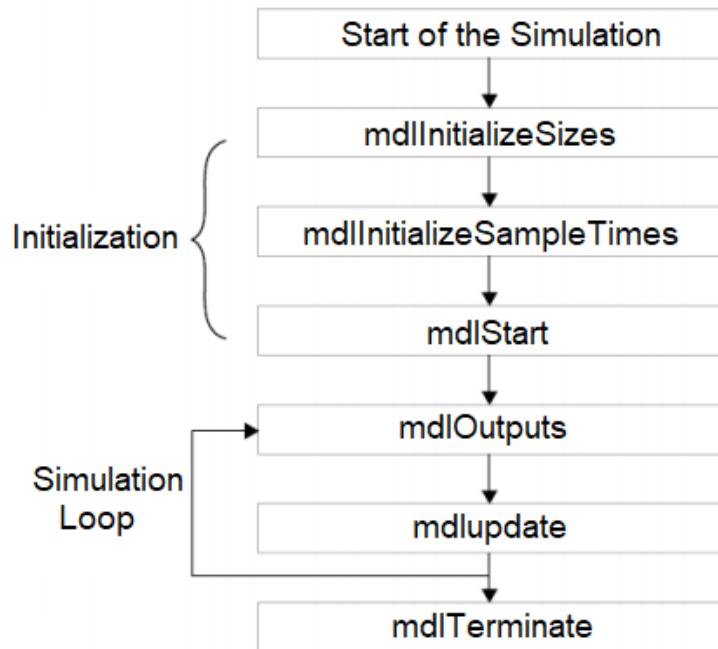


Figura 68. Ciclo de la S-function. Fuente: Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/11477/fichero/Memoria%252F03.pdf>

1.8.4 Virtual Reality Toolbox.

La realidad virtual aplicada en el Matlab, es una forma de poder comprobar mediante una gráfica en 3D, el funcionamiento de un determinado proyecto con las características concebidas, para su óptimo funcionamiento; con ello se logra verificar si los resultados previstos, concuerdan con un funcionamiento real tal como sucedería si se hubiese elaborado en forma física.

La ventaja que nos ofrece esta virtualidad, es poder hacer pruebas diversas, entre ellas la de cambiar especificaciones a voluntad y observar cuales son los resultados, sin que se produzca daño físico alguno, lo que constituye un factor importante en la determinación de valores apropiados, para obtener resultados coherentes.

Para el uso de estas herramientas que son capaces de crear realidad virtual, hay que hacer uso de interfaces, que pueden corresponder a Matlab o a Simulink, aunque también es posible usar los dos a la vez, si se cree conveniente.

1.8.4.1 Creación de un mundo virtual.

Consiste en crear un espacio donde tendrá lugar la simulación requerida, en el cual hay que ir agregando todos los módulos que sean necesarios, con las características técnicas apropiadas, como la escala a utilizar, grados de rotación con la dirección requerida y el movimiento de traslación que se le desea brindar.

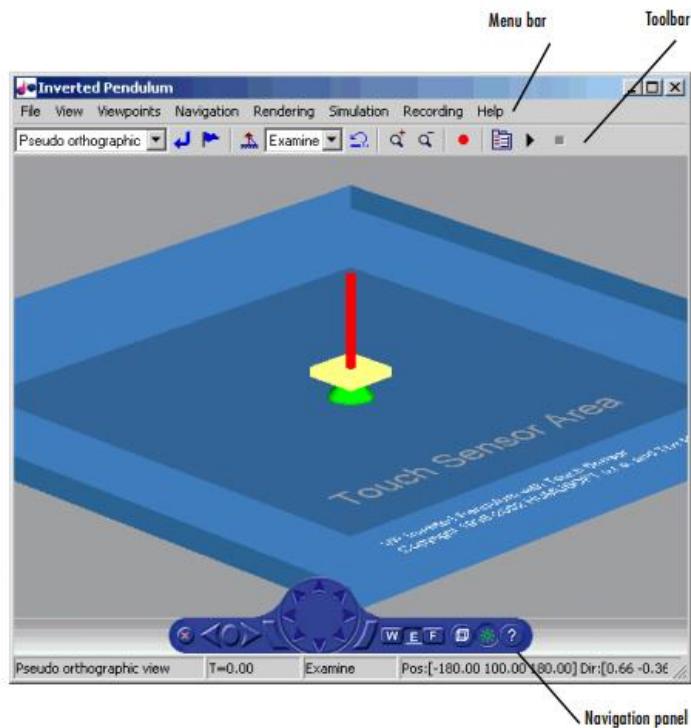


Figura 69. Creación mundo virtual. Fuente: Recuperado de http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/vr.pdf

Hoja de Práctica

1.1 Tema

Simulación del sismómetro en 3D.

1.2 Objetivos

- 1.2.1 Aprender los conceptos básicos de sismología.
- 1.2.2 Analizar e interpreta la importancia del sismómetro.
- 1.2.3 Conocer la función del sismómetro en el suelo mediante una simulación de un sismo.
- 1.2.4 Aprender los conceptos básicos de los simuladores MATLAB, Simulink y VRealm Builder 2.0

1.3 Materiales y equipos

- 1.3.1 Hojas bond
- 1.3.2 Proyector.
- 1.3.3 Plumones y pizarra.

1.4 Cuestionario

- 1.4.1 ¿Qué es sismología?
- 1.4.2 ¿Qué son los sismos?
- 1.4.3 ¿Cuántos tipos de ondas sísmicas hay?
- 1.4.4 ¿Qué es un sismómetro?
- 1.4.5 ¿Qué es un sismógrafo?
- 1.4.6 ¿Cuántos tipos sismógrafos hay?

1.5 Evaluación

Describe la imagen y los pasos para crear un objeto en el simulador.

Ficha de observación					
Tema	Simulación de un sismómetro en 3D				
Indicador	Reconoce los valores de una simulación de un sismómetro en 3D				
Especialidad	Electrónica		Promoción: 2014	Fecha: 11/07/2018	
Nº de orden	Estudiantes	Indicadores		Puntaje	
01		Emplea correctamente el polímetro. (0 – 4)	Reconoce el valor nominal de cada resistencia. (0 - 4)		
02			Reconoce el valor real de cada resistencia. (0 - 4)		
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
11					

Síntesis

El presente trabajo, referido específicamente al modelamiento clásico en el espacio de estado de los sistemas de control en tiempo discreto, constituye un tema de importancia actual, por tratarse en primer lugar, de un estudio que nos puede servir inclusive en la vida cotidiana para generar nuevas conexiones e integraciones a un nuevo mundo.

El trabajo de investigación inicia con la evolución a través del tiempo de los sistemas de control, luego a fin de tener una idea clara y precisa de lo que significa, se definen conceptos básicos que servirán para entender el teorema de espacio de estado aplicados en un sistema de control en tiempo discreto; dado que en los tiempos actuales, se han desarrollado técnicas que hacen posible el control de sistemas dinámicos, mediante medios digitales que suplen eficientemente a los analógicos, ya que se encuentran reforzados por el uso de equipos de cómputo apropiados y softwares que permiten la realización de simulaciones de los modelos creados.

Uno de los temas importantes que se ha tocado en la presente monografía, es la forma como se realiza la conversión de señales analógicas a digitales, con la finalidad de comprender íntegramente, como las señales de forma continua pueden ser representadas en forma discreta, sin perder la esencia de la información original; por lo que se detalla la forma como se lleva a cabo el muestreo de la información, como se determina la cuantificación y finalmente la manera de codificar las señales obtenidas, para que puedan ser representadas en la posterior simulación.

El proyecto realizado, comprende los pasos necesarios para poder simular en tres dimensiones, un sismómetro del tipo mecánico, para ello se ha procedido a explicar el modelo matemático que la va a representar y efectuar las ecuaciones del sistema creado, con la finalidad de lograr realizar con esta información, la simulación virtual del modelo

que caracteriza al proyecto, cuyo resultado va a permitir observar errores o en todo caso confirmar que es correcto. También, se explica acerca de la aplicación didáctica que tendría la investigación mediante sesiones de aprendizaje, hoja de información y hoja de práctica.

Apreciación crítica y sugerencias

Se obtuvieron resultados muy satisfactorios al momento de correr la simulación y visualizar los resultados de la dinámica del sismómetro mecánico en un ambiente de realidad virtual, ya que resulta muy difícil interpretar los resultados de los modelos matemáticos y la acción del algoritmo de control en un gráfico XY.

Para realizar la simulación se cuidaron varios parámetros, el tipo de solucionador, la tolerancia relativa y el tamaño máximo y mínimo del incremento del tiempo. Es muy importante la configuración de estos parámetros, ya que depende del tiempo que toma Simulink en realizar la simulación del modelo. Así mismo, MATLAB, fue de gran utilidad para el desarrollo de esta actividad ya que permitió el trabajo de una gran cantidad de información, como la que es entregada por un sismógrafo, para su análisis y desarrollo de teorías sin mayores problemas, debido a su fácil manera de programar.

En caso similares de investigación hay que tener cuidado y mucha observación y visualización en los resultados de la dinámica del sismómetro mecánico en un ambiente de realidad virtual, ya que resulta muy difícil interpretar los resultados de los modelos matemáticos y la acción del algoritmo de control en un gráfico' XY.

Hay que determinar adecuadamente el modelo matemático a trabajar y establecer las ecuaciones específicas del sistema que le correspondan, que puedan ser entendibles y arrojar resultados previstos durante la simulación. Es conveniente tomara como referencia teórica la base del péndulo para la función de respuesta y esta puede variar dependiendo del modelo y los valores que puedan ingresar, determinando el posible error que pueda presentar el modelo y de esta forma confirmar en que grado es efectivo.

Para realizar la simulación debemos cuidar varios parámetros, el tipo de solucionador, la tolerancia relativa y el tamaño máximo y mínimo del incremento del

tiempo; es muy importante la configuración de estos parámetros, ya que depende del tiempo que toma Simulink en realizar la simulación del modelo.

Asimismo, se sugiere el uso del programa MATLAB para el desarrollo de esta actividad, ya que permite procesar gran cantidad de información como la entregada por un sismógrafo, para realizar el análisis y desarrollo de teorías sin presentar ningún tipo de dificultad, debido a la fácil manera de programar.

Referencias

- Ataurima, M. (2013). *Matlab & Simulink para Ingeniería Nivel I*. Universidad de Ciencias y Humanidades. Facultad de ciencias e ingeniería. Perú. Recuperado de https://issuu.com/omarsoft/docs/matlab___simulink_para_ingenieria
- Brunete, A., San-Segundo, P. y Herrero, R. (2020). *Introducción a la automatización industrial*. Universidad Politécnica de Madrid. España. Recuperado de https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/
- Bullón, O. (2009). *Automatización industrial*. (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional. México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/5632/1/AUTOMATIZACIONIND.pdf>
- Carrillo, A. (2011). *Sistemas Automatizados de Control. Fundamentos básicos de análisis y modelado*. Universidad Nacional Experimental “Rafael María Baralt”. 2º Edición. Venezuela. Recuperado de http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf
- Carrillo, I., Arocena, I., y Lera, G. (2010). *Caracterización y control del regulador de Watt*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. España. Recuperado de <https://academic-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/4185/577604.pdf;jsessionid=C0A2DD1E2889C4707DCF2E583BB95CDE?sequence=1>
- Díaz, J., Aranda, J., y De la Cruz, J. (2006). *Apuntes de automática II*. Universidad de Educación a Distancia (UNED). Madrid. España. Recuperado de http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:627/apuntes_auto2.pdf

- Gil, J. y Rubio, A. (2010). *Fundamentos de Control automático de Sistemas Continuos y muestreados*. Universidad de Navarra. España. Recuperado de
<https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/7096/4/Gil-Control.pdf>
- Gómez, D. (2019). *Construcción de un regulador de Watt para el control de un motor de corriente continua*. (tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia.
- Guerra, A. (s.f.). *Evolución histórica de los sistemas de control*. Universidad Nacional de Quilmes. Argentina. Recuperado de
http://www.infoplcl.net/files/documentacion/mercado_automatizacion/infoPLC_net_Evolucion_Historica_Sistemas_Control.pdf
- Gutiérrez, R. (2019, 24 de junio). “Predicción de sismos: objetivo todavía inalcanzable. *Gaceta UNAM*”. Recuperado de <https://www.gaceta.unam.mx/prediccion-de-sismos-objetivo-todavia-inalcanzable/>
- Moyano, M., Iñigo, G. y Abadie, J. (2006). *Sismógrafo*. 1a edición. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina. Recuperado de http://www.ifdcvm.edu.ar/tecnicatura/Recursos_Didacticos/27.pdf
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto*. Segunda edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamérica S.A. México. Recuperado de
http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/~coutinho/disciplinas/TCC/Sistemas_de_Control_en_tiempo_Discreto-Katsuhiko_Ogata.pdf
- Pérez, M. (2007). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. Universidad Nacional de San Juan. Argentina. Recuperado de <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>
- Piedrafita, M. (1999). *Evolución histórica de la ingeniería de control*. Recuperado de
<http://automata.cps.unizar.es/regulacionautomatica/historia.PDF>

- Restrepo, R. y Ospina, J. (2013). *Diseño de un sismómetro electromagnético para medir movimientos telúricos verticales.* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira. España. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4097/6812R436D.pdf?sequence=1>
- Rodríguez, J. (2003). *Sistemas de control.* UNET. Venezuela. Recuperado de <http://www.unet.edu.ve/~jlrodriguezp/ctrlterm.pdf>
- Rodríguez, S. (2019). *Modelamiento matemático de la acción de los terremotos sobre edificios de varios pisos usando sistemas de ecuaciones diferenciales de segundo orden.* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Callao. Recuperado de <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/4443/rodriguez%20chuquimanco%20quimica%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sotelo, L., y Yamir, E. (2016). *Sismógrafo electrónico de medición y detección de movimientos telúricos con salida impresa, para la carrera de Ingeniería Geológica de la UNAM-Managua, 2016.* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Nicaragua. Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/3207/1/70043.pdf>
- Vargas, J. (2010). *Historia del control automático.* Asociación Mexicana de Mecatrónica. Recuperado por <https://www.mecatronica.net/emilio/ppt/HistoriaControl.pdf>

ARQUITECTURA GENERAL DE SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES

Ing. Pablo Antonio Arellano González

pabloaag@gmail.com

M. en C. Miguel Hernández Bolaños

mbolanos@ipn.mx

Ing. Nilda Fabiola Encarnación Avalos

fabi-nil_34@hotmail.com

M. en C. Israel Rivera Zárate

irivera@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional-CIDETEC

Resumen

Los sistemas de adquisición de señales también conocidos como (DAQ - Data Acquisition), son una pieza clave para el procesamiento de señales analógicas, el diseño de estos sistemas está compuesto por una serie de subsistemas los cuales, en las primeras etapas se encargan de preparar la señal para su discretización, posteriormente un Convertidor Analógico Digital (CAD) convierte esas señales en valores discretos para finalmente ser procesados, comúnmente por un equipo de cómputo. En este trabajo se da un panorama general a considerar para el diseño o elección de un sistema DAQ, ya que es fundamental conocer cada etapa que lo conforma para poder digitalizar apropiadamente una señal proveniente de un fenómeno físico.

1. Introducción

Un Sistema de Adquisición de Señales (DAQ) tiene como objetivo adquirir información de variables provenientes de estímulos físicos el cual procesa, registra y presenta la información de acuerdo con la aplicación a la que esté orientada[1]. Los sistemas DAQ están integrados por un conjunto de elementos dispuestos y ordenados para formar subsistemas que realizan tareas que garantizan una buena representación digital del fenómeno medido, esto con el objetivo de utilizar procesadores de señales digitales; Con lo cual se obtiene una amplia gama de aplicaciones en diversas áreas como en Sistemas de Control, Monitoreo de Procesos, Sistemas de Comunicaciones, Dispositivos de uso cotidiano como Smartphones, Lavadoras, Autos etc. Se podría asumir, que los sistemas DAQ se encuentran presentes en todo tipo de dispositivos que requieran procesar información originada por sensores analógicos. Para facilitar su comprensión se ha considerado las siguientes etapas, las cuales se detallarán de acuerdo con el siguiente diagrama ver (Figura 1).



Figura 1. Diagrama General Sistema DAQ.

2. Transductores (Sensores)

La función de estos elementos de manera general es convertir estímulos del entorno en otro tipo de señal, como magnitudes térmicas, magnéticas, sonoras, etc. a voltaje, corriente, resistencia (Figura 2) también conocidos coloquialmente como sensores por su capacidad de percibir estímulos específicos[4]. Algunos ejemplos de transductores son: foto-resistencias, micrófonos y potenciómetros transformando estímulos lumínicos, ondas de audio y desplazamientos respectivamente a voltaje. Algunos de los parámetros que se deben considerar en los transductores son sensibilidad, resolución y exactitud[2], de los cuales depende la fiabilidad de las mediciones.

3. Acondicionamiento

En esta etapa se busca una adecuación de la señal (Figura 2), el margen de amplitud de la señal proveniente del sensor debe coincidir con la entrada de la siguiente etapa compuesta por un Convertidor Analógico Digital (CAD) , es decir en algunos casos se necesita amplificar o atenuar la señal proveniente de la magnitud medida, también se pueden utilizar diversos filtros para remover perturbaciones que alteren la señal que se quiere medir, pero principalmente se busca aprovechar el rango dinámico del CAD como se verá más adelante. En esta etapa, también se realizan funciones de linealización, comparación, filtrado, entre otras [4]. Es común que los fabricantes de transductores incluyan la etapa de acondicionamiento de la señal dentro del mismo dispositivo de sensado, por lo cual en ocasiones es omitida en la arquitectura de los DAQ sin embargo es necesario considerarla para su posterior acoplamiento.

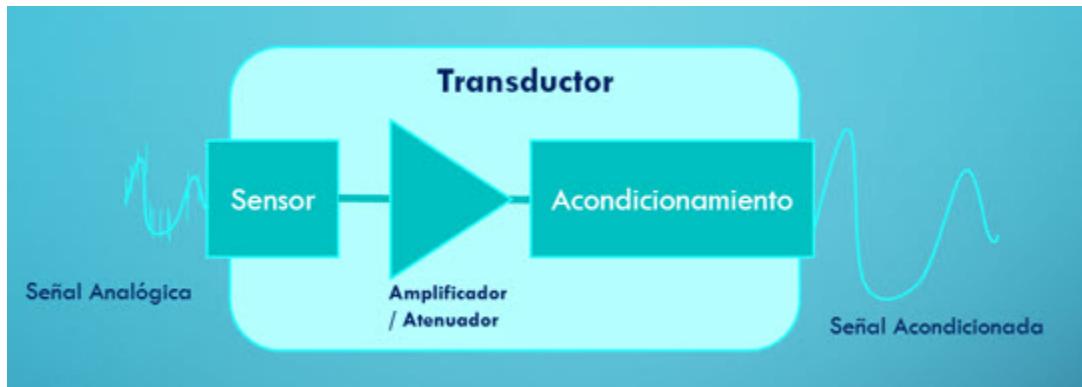


Figura 2.Esquema general de transductor.

4. Convertidor Analógico Digital (CAD)

Los CAD son circuitos integrados cuya función se basa en convertir señales continuas en el tiempo a información digitalizada, es decir a valores discretizados en valores altos y bajos de voltaje (ceros y unos), para que puedan ser interpretados por procesadores digitales. (Figura 3.) previo a la discretización existe otro elemento llamado multiplexor el cual en algunas arquitecturas de CAD lo incluyen en el mismo circuito integrado del cual se hablará posteriormente.

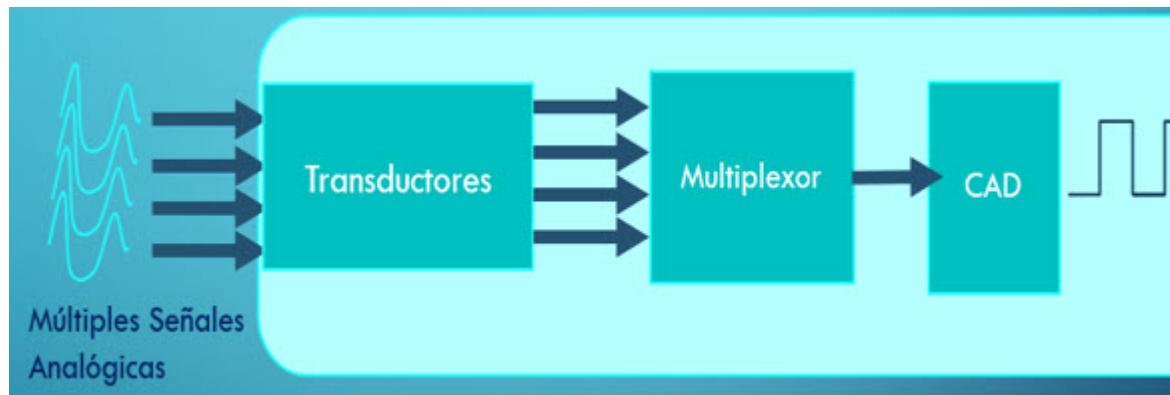


Figura 3.Salida Digital de Señales.

La digitalización de señales analógicas se realiza en dos etapas, la primera es la cuantificación la cual representa la amplitud de la señal mediante una serie de valores en instantes determinados, estos valores están limitados por la resolución del convertidor expresados como 2^n , donde n es la resolución del convertidor en bits, la segunda etapa es la codificación, la cual representa ese valor de señal en valores de tensión 0 para nivel bajo y 1 para nivel alto, con lo cual se establece una relación entre los instantes cuantizados y su representación codificada en binario (Figura 4) , la cual está dada por la siguiente expresión $V=V_{Ref}/Res$ donde el voltaje de referencia es dividido entre la resolución del convertidor con la que se establecen los intervalos de voltaje[4].

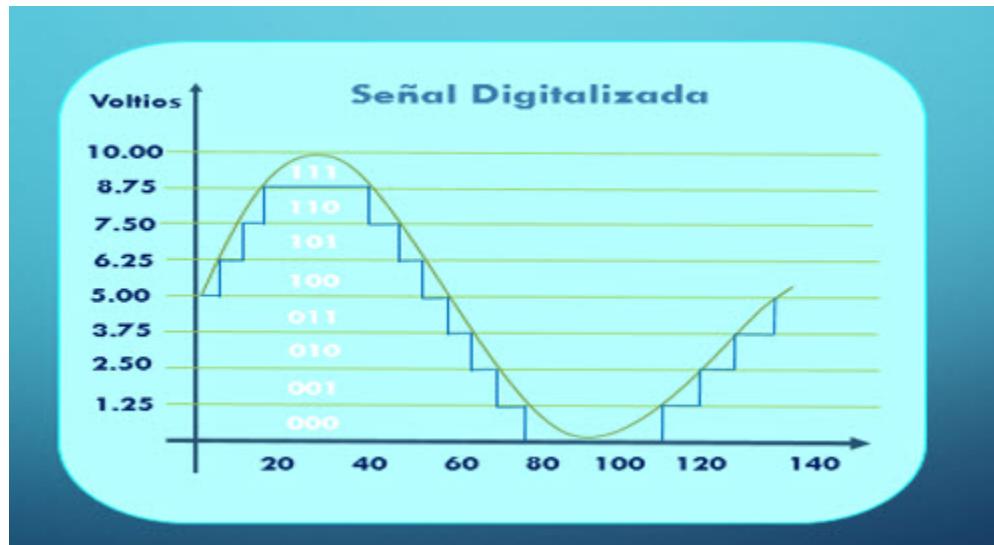


Figura 4. Señal Discretizada [4].

Existen diversos tipos de CAD que presentan diferentes especificaciones a continuación se describen algunos de los más comunes (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de CAD [4].

Tipos de CAD	Detalles más relevantes
Paralelos (Flash)	Es considerado el método de converción más rápido. Internamente funciona con un divisor de voltaje y requiere 2^{n-1} comparadores.
Aproximaciones Sucesivas	Uno de los convertidores con un buen rendimiento. Tienen tiempos de conversión entre 1 y 10 ms.
Servo (Tracking)	Su nombre proviene de la analogía, ya que la salida sigue la entrada cualquier pequeño cambio en la tensión de entrada. Es un convertidor de alta velocidad que cuenta o descontando ya que la salida es bidireccional.
Sigma delta	Muy utilizados para aplicaciones de medias.
Rampa Simple	Utilizan una conversión diferente a la anterior. Primero convierte la tensión de entrada en una corriente, y luego convierte esta magnitud en una salida digital hasta que la salida del integrador iguala la tensión de entrada.
Doble y Triple Rampa	Este tipo de convertidores presenta una mejor resolución y una mejor respuesta dinámica. Una de las soluciones es emplear dos fuentes de corriente.

4.1 Multiplexado

El Multiplexado como se mencionó previamente antecede a la digitalización y dependiendo de la arquitectura del CAD se incluye en el mismo empaquetado, el multiplexado de señales se refiere a la capacidad de medir múltiples señales provenientes de diferentes entradas (sensores) y poderlas procesar por un mismo CAD y así aprovechar al máximo el margen dinámico (Figura 5) lo que da una gran versatilidad al sistema DAQ facilitando el registro de múltiples fenómenos físicos en un mismo sistema. Cuando se tienen diversos canales de entrada se comparten recursos, lo que implica compartir toda la cadena de medida excepto el sensor[4], aquí es donde el multiplexor asigna a cada canal el recurso del CAD compartido, no necesariamente todos los CAD incluyen multiplexores existen los que cada entrada de señal posee una estructura de digitalización independiente.



Figura 5.Diagrama Multiplexor.

5. Procesamiento

Para el procesamiento de los datos una vez digitalizados se tienen dos tipos de sistemas DAQ, online y offline, si las señales se procesan conforme se van adquiriendo es un sistema online, y si se procesan en tiempo diferido es un sistema offline[4], cabe mencionar que para los sistemas DAQ en tiempo diferido el registro de datos debe hacerse en algún medio de almacenamiento para su posterior procesamiento digital, éste debe tener la suficiente capacidad de memoria considerando el volumen generado por el proceso a monitorear.

Para seleccionar el hardware DSP (Digital Signal Processor) que analizará los datos recabados, es importante evaluar la aplicación a la cual va dirigida el sistema DAQ, siendo usados para tal fin los microcontroladores, computadoras de escritorio, computadoras industriales, microcomputadoras, Field Programming Gate Array (FPGA's), procesadores dedicados entre otros equipos que sean capaces de hacer operaciones numéricas a alta velocidad (Figura 6).

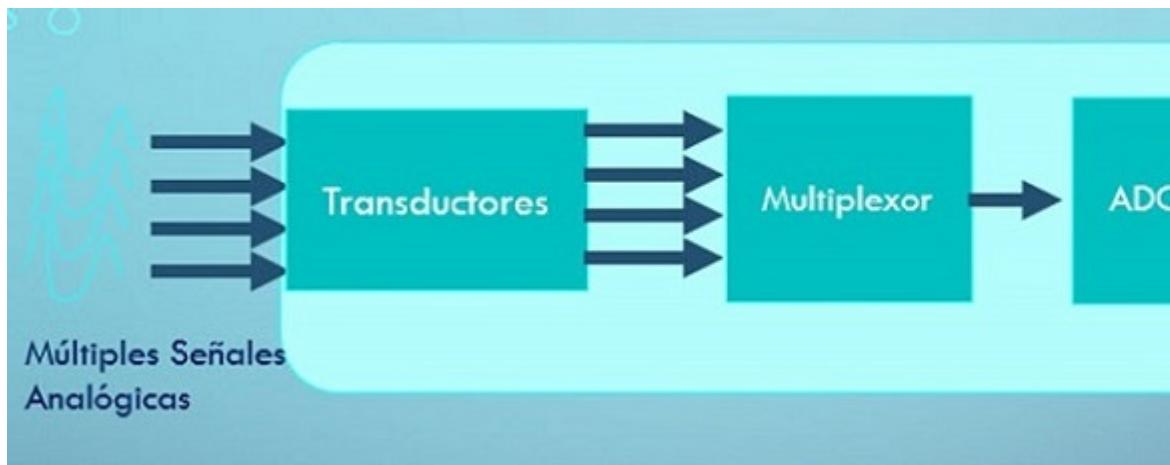


Figura 6. Sistema DAQ con procesador.

5. Conclusión

La arquitectura general de un sistema de Adquisición de Señales contiene una serie de subsistemas, los cuales deben ser considerados para su diseño o en su defecto la selección de un dispositivo comercial, ya que dependiendo de la aplicación se debe tomar en cuenta, las velocidades de muestreo, resolución, compatibilidad entre software y hardware, arquitectura CAD, robustez, conversión entre dominios analógicos etc. El objetivo buscado en este artículo es presentar un panorama general sobre las etapas internas que componen a este tipo de tecnología el cual pueda ayudar a los interesados en la materia, a ahondar en cada una, ya que se presta para el estudio de las particularidades y consideraciones que las componen.

Referencias

1. National Instruments (**2019.**) *Engineer's Guides to the Digitalization of Analog Signals.* Recuperado el 30 de septiembre de 2019, de <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
2. National Instruments (**2019.**) *NI Data Acquisition: The Accuracy and Performance Difference.* Recuperado el 30 de septiembre de 2019, de <https://www.ni.com/documentation/9209/en/#toc3>
3. Pallás, R. (**1993**). *Adquisición y Distribución de Señales.* Barcelona España: Marcombo.
4. Pallás, R (**2005**). *Sensores y Acondicionadores de Señal, Problemas Resueltos.* . Barcelona España: Marcombo.



Ciencias Holguín

E-ISSN: 1027-2127

revista@ciget.holguin.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica

de Santiago de Cuba

Cuba

Challenger-Pérez, Ivet; Díaz-Ricardo, Yanet; Becerra-García, Roberto Antonio

El lenguaje de programación Python

Ciencias Holguín, vol. XX, núm. 2, abril-junio, 2014, pp. 1-13

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba

Holguín, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181531232001>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

El lenguaje de programación Python/The programming language Python

Ivet Challenger-Pérez. ichallengerP@facinf.uho.edu.cu

Yanet Díaz-Ricardo. ydiazr@facinf.uho.edu.cu

Roberto Antonio Becerra-García. idertator@facinf.uho.edu.cu

Institución de los autores

Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”

PAÍS: Cuba

RESUMEN

El software libre se ha convertido en uno de los movimientos tecnológicos de mayor auge en el siglo XXI. Para su desarrollo ha sido necesario contar con un grupo de herramientas que hagan óptima su utilización y sean fáciles de aprender. Python es un lenguaje de programación que cumple con lo planteado y se viene perfilando como una opción recomendada para el desarrollo de software libre. En este artículo se realizó un análisis de sus características fundamentales, así como de los principales usos que tiene en la actualidad.

PALABRAS CLAVES: SOFTWARE LIBRE; LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN; PYTHON

ABSTRACT

Free Software has become one of the most important technological movements in the 21st century. Its development has required a set of tools that make its use more optimal and easy to learn. Python is a programming language that fills this requirement and is fast becoming a recommended choice for free software development. This paper makes an analysis of its main features, as well as the main cases in which it is employed today.

KEY WORDS: FREE SOFTWARE; PROGRAMMING LANGUAGES; PYTHON

INTRODUCCIÓN

Es el año 2013, y en la Industria Informática ha venido tomando influencia un fenómeno que se conoce como **software libre**. Este es un movimiento que proclama el acceso al código fuente de un programa, lo que admite ser libre de

uso, ejecución, distribución y modificación. Es decir, el nuevo software creado bajo este concepto podría emplearse para cualquier fin, ejecutarse en cualquier ambiente, distribuirse a discreción del propio usuario y modificarse de ser necesario.

Durante los años 90 ocurre una serie de eventos que marcan ciertas pautas para el futuro desarrollo del software libre, como es el lanzamiento de la primera versión del núcleo Linux por Linus Torvalds en 1991, y en ese mismo año Guido van Rossum libera la primera versión del lenguaje de programación Python.

Los lenguajes de programación son la herramienta básica de construcción de programas, como lo son el machete y el azadón para un campesino, el pico y la pala para un constructor. Python ha ido ganando en adeptos en comunidades como la de software libre, científica y educacional, por su sencillez y posibilidad de concentrarse en los problemas actuales.

Este artículo hace referencia a las principales características y los diferentes usos de este lenguaje de programación, por lo que se ha tratado de simplificar la parte técnica. No obstante, para su completa comprensión se necesita un nivel básico de conocimientos acerca de programación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de este trabajo se emplearon diferentes métodos de investigación, fundamentalmente teóricos, entre los que se destacan el histórico lógico y el análisis y la síntesis.

RESULTADOS DEL TRABAJO

Python cuenta con facilidades para la programación orientada a objetos, imperativa y funcional, por lo que se considera un lenguaje multi-paradigmas. Fue basado en el lenguaje ABC y se dice que fue influenciado por otros como C, Algol 60, Modula-3 e Icon según su propio autor¹.

¹ Kuchling, Andrew. Interview with Guido van Rossum. *Linux Journal* 1998 Nov # 55 [seriada en línea] <http://www.linuxjournal.com/article/2959> [consultado: 3 de octubre de 2012].

Es un lenguaje de alto nivel ya que contiene implícitas algunas estructuras de datos como listas, diccionarios, conjuntos y tuplas, que permiten realizar algunas tareas complejas en pocas líneas de código y de manera legible.

Historia



Python fue creado por Guido van Rossum, un programador holandés a finales de los 80 y principio de los 90 cuando se encontraba trabajando en el sistema operativo Amoeba. Primariamente se concibe para manejar excepciones y tener interfaces con Amoeba como sucesor del lenguaje ABC.

El 16 de octubre del 2000 se lanza Python 2.0 que contenía nuevas características como completa recolección de basura y completo soporte a Unicode. Pero el mayor avance lo constituye que este comenzó a ser verdaderamente desarrollado por la comunidad, bajo la dirección de Guido.

El Python 3.0 es una versión mayor e incompatible con las anteriores en muchos aspectos, que llega después de un largo período de pruebas el 3 de diciembre del 2008. Muchas de las características introducidas en la versión 3 han sido compatibilizadas en la versión 2.6 para hacer de forma más sencilla la transición entre estas.

A Guido van Rossum le fue otorgado el Free Software Award (Premio del Software Libre) en el 2001, por sus trabajos en la creación y desarrollo del lenguaje Python. En el 2005 fue contratado por Google, donde trabaja en la actualidad, aunque sigue liderando los esfuerzos en el desarrollo del Python.

Cultura de Python

Los desarrolladores de Python han creado algo que se podía denominar como una subcultura dentro de la comunidad de desarrolladores. Es decir, estos tienen sus propias formas o metodologías de escribir código. Según el sitio web oficial de [Python](#) existe una lista de principios de diseño que se deberían seguir cuando se escribe código en Python:

- Hermoso es mejor que feo
- Explícito es mejor que implícito
- Simple es mejor que complejo
- Plano es mejor que anidado

- Disperso es mejor que denso
- El código legible cuenta
- Casos especiales no son lo suficientemente especiales para romper las reglas
- Casi siempre lo práctico vence a lo formal
- Los errores no deben pasar nunca desapercibidos, a menos que se especifique este comportamiento
- Ante una ambigüedad, descarte la tentación a adivinar
- Debe haber una, y preferentemente una sola, manera obvia de lograr algo, aunque esta generalmente no está clara a primera vista a menos que seas un genio
- Ahora es mejor que nunca, aunque en muchas ocasiones nunca es mejor que ahora mismo
- Si la implementación es difícil de explicar, entonces es una mala idea
- Si la implementación es fácil de explicar, entonces pudiera ser una buena idea
- Los espacios de nombre son una buena idea, hagamos más de eso

Esta lista², que pudiera tomar libros en explicar en toda su totalidad, simplemente expone que mientras más sencilla y clara se mantengan e implementen las ideas, mejores serán estas.

Eventos

Python, al convertirse en un fenómeno internacional, cuenta con un grupo de eventos que se realizan para difundir y discutir ideas respecto a este. Al igual que la mayoría de las tecnologías importantes, cuenta con una conferencia oficial, el PyCon (Python Conference) que se realiza una vez al año en varias ciudades del mundo.

El PyCon es una gran fuente de conocimientos para aquellos interesados en adentrarse en diversos temas y tecnologías de Python, además de ser una buena opción para exponer productos y tecnologías relacionadas con este.

² Peters, Tim. The Zen of Python. 2004 [documento en línea]

<http://www.python.org/dev/peps/pep-0020/> [consultado: 3 de octubre de 2012].

Existen también otras conferencias con tópicos específicos como la de SIPI, donde se debate básicamente el uso del Python por la comunidad científica, entre otras.

Sintaxis

La sintaxis de Python es muy sencilla, tanto que en algunas ocasiones parece pseudocódigo. Es muy interesante observar las diferencias que existen entre el programa Hola Mundo de Python y el de otro lenguaje de alto nivel como C++:

```
#include <iostream>
using namespace std;
int main()
{
    cout << "Hello World" <<
endl;
return 0;
}
```

Fig. 1 Programa Hola Mundo en C++

Y ahora se ve cómo lograr esta misma tarea en Python:

```
print "Hello World"
```

Fig. 2 Programa Hola Mundo en Python

No es necesario explicar mucho sus diferencias porque resaltan a simple vista, en Python es más simple que en C++. Y esto es de vital importancia para ramas como la educación, donde al utilizar lenguajes como C++, generalmente se escuchan frases como “No te preocupes por eso, más adelante en el curso lo veremos”³ que pueden ser muy dañinas en el proceso de enseñar y motivar a personas a que aprendan programación.

Intérprete al vuelo

Python cuenta con un intérprete o consola que permite probar ciertas capacidades del lenguaje sin tener que crear un módulo de este. Incluso, en ocasiones se utiliza como una poderosa calculadora, con capacidades muy

³ Downey, Allen B. How to Think Like a Computer Scientist. Learning with Python, Green Tea Press, 2008.

similares a las que ofrece el lenguaje Matlab para la realización de ciertas tareas.

Librería Estándar

Una de las fortalezas de Python, y quizás la mayor, es la librería estándar con que cuenta. Con decenas de módulos cubre la mayoría de las necesidades básicas de un programador y mucho más. En esta se le da cobertura de forma muy intuitiva a tópicos como:

- Cadenas
- Estructura de datos
- Funciones numéricas y matemáticas
- Compresión de datos
- Formatos de archivo
- Criptografía
- Servicios de los Sistemas Operativos
- Comunicación entre Procesos
- Manejo de datos de Internet
- Servicios multimedia
- Manejo de excepciones

Existen más de 40 tópicos en la referencia de la librería de Python⁴ por lo que se puede afirmar que es una de las más completas con que se cuenta en la actualidad, comparable con la de Java y .NET.

Rendimiento

Uno de los grandes mitos alrededor de Python es acerca de su pobre rendimiento. Esto no es del todo correcto, ya que aunque es un lenguaje interpretado y estos tienden a ser más lentos que los lenguajes compilados, Python, a diferencia de otros lenguajes interpretados, ha implementado toda su librería estándar en el lenguaje C, lo que hace que sus funciones primitivas sean bastante eficientes. Además, puede compilarse su código a bytecodes, similar al que usan Java y .NET, lo que optimiza aún más el proceso de interpretación.

Documentación

⁴ Guido van Rossum y F.L. Drake. The Python Library Reference. Release 2.6.4. Ene. 2010.

Otra de las características principales de Python es la inclusión de un sistema de documentación. La documentación fue tenida en cuenta a la hora del diseño del lenguaje. Por ejemplo, todas las funciones y clases tienen una variable implícita que se llama *doc* comúnmente llamada docstring o cadena de documentación⁵. En estas cadenas se describe el uso de esa función o clases y los parámetros que intervienen en detalle. La sintaxis de estos docstring es muy similar a la de JavaDoc.

Estas cadenas de documentación pueden llamarse inclusive en tiempo de ejecución, por lo que se pueden consultar en el propio intérprete usando la función *help*, modelo muy similar al empleado en Matlab. La librería estándar de Python fue documentada utilizando este método.

Extensibilidad

De todas las características que posee Python, una de las más importantes es su capacidad de reutilizar código escrito en los lenguajes C y C++. Existen mecanismos que hacen muy sencilla la tarea de envolver funciones y clases hechas en estos lenguajes, entre los que se encuentran Boost.Python, Sip y Shiboken.

La importancia de esta integración es relevante, ya que las bases de código en lenguajes como C y C++ son las más grandes disponibles por el software libre hoy en día, y permiten no tener que duplicar código ya existente.

Licencia

Python es liberado bajo una licencia propia llamada Python Licence que ha sido certificada por el movimiento Open Source, y es compatible con la GPL (GNU Public Licence) de la Free Software Foundation (Fundación del Software Libre). La principal diferencia de esta con respecto a la GPL es que no existe una restricción copyleft en esta, concepto que la acerca más al movimiento OpenSource. Lo que quiere decir que se pueden producir programas que se podrán distribuir libremente sin la necesidad de entregar su código fuente. Esto significa que puede usarse Python tanto para hacer software libre como software privativo.

⁵ González Duque, Raúl. Python para todos. [documento en línea]

<http://mundogeek.net/tutorial-python/> [consultado: 2 de octubre de 2012].

Herramientas

A un lenguaje de programación le es vital contar con herramientas que hagan más productivo el trabajo con este. Algunas de las más importantes de Python son:

- **Implementaciones**

Al igual que Java, que cuenta con distintas máquinas virtuales como IceTea, Sun JDK, OpenJDK, etc.; Python posee varias implementaciones. La más importante, y que es la que se mantiene oficialmente, es CPython, elaborada completamente en lenguaje C y se considera como la más estable de todas.

Después de esta existen otras importantes, como IronPython escrita en C# y diseñada para la plataforma .NET, Jython implementada en Java y compila para el bytecode de esta plataforma, PyPy realizada con el propio Python y destinada para correr en diversas plataformas, y tinyPy una implementación minimalista que fue diseñada para caber en 64 Kb de memoria, muy útil para sistemas embebidos.

- **Entornos de Desarrollo Integrado**

Dado el éxito tenido por Python en plataformas Unix, se han elaborado para este una gran cantidad de entornos de desarrollo integrado, considerados entre los de mejor calidad:

1- IDLE (Integrated Development Environment), un entorno de desarrollo bastante simple desarrollado en el propio Python, por lo cual cuenta con un intérprete al vuelo y fue desarrollado usando Tkinter. Este es un entorno ideal para pequeñas aplicaciones, debido a su sencillez, además de que se distribuye junto con los paquetes de Python para los sistemas operativos más comunes: Windows, Linux, MacOS. Cuenta con resaltado de código y depurador.

2- Eclipse con el plugin PyDev. El Eclipse es una plataforma de desarrollo de aplicaciones llamada RCP, en la cual se montan varios plugins que extienden su funcionalidad. En el caso de PyDev, cuenta con un sistema de proyectos que ayuda a organizar las aplicaciones, además de tener completado inteligente de código, depurador, resaltado de código, gestión de documentación, entre otras muchas características que lo hacen ideal para medianos y grandes proyectos.

- **Servidores de Aplicaciones**

La web se ha convertido hoy en el centro de la vida digital del planeta. Un lenguaje que no cuente con el debido soporte técnico de los distintos servidores de aplicaciones web puede considerarse un lenguaje obsoleto.

Python puede ser usado en conjunto con el servidor web Apache vía mod_python, gracias a la API Web Server Gateway Interface, desarrollada para crear un estándar que sirviera para estos fines.

Python cuenta con otros servidores de aplicaciones y frameworks que hacen posible el desarrollo de aplicaciones web, como Zope, Pylons, web2py, TurboGears y Django. De esta lista resalta el Django, que es un framework muy productivo que cuenta con características de tan alto nivel, como un ORM (Object to Relational Mapper), y un sistema de plantilla muy útil a la hora de elaborar formularios.

Casos de Éxito

Una medida principal para saber cuán exitoso es un lenguaje es saber quién lo usa, y qué uso le da a este. A continuación se muestran los principales usos que se le da a Python hoy en día.

- **Empresas que emplean Python comercialmente**

Google, uno de los gigantes de la informática y el Internet, ha empleado el Python para construir una gran parte de sus algoritmos de búsqueda para la web, no por gusto esta compañía contrató a Guido van Rossum para trabajar para ellos.

Otras empresas como Lucasfilm lo usan como plataforma de guiones (scripts) para la elaboración de los motores de representación en 3D para sus películas.

- **Productos libres en Python**

Python es un lenguaje que está de moda para escribir productos de software libre, la mayoría de las grandes distribuciones lo usan como estándar para escribir sus aplicaciones, entre las que se destaca Ubuntu.

El Gimp, un paquete de retoque fotográfico similar al Adobe Photoshop, usa como lenguaje de guiones para la realización de filtros a la medida Python.

El Blender, un software para modelado 3D, similar al 3D Studio o al Maya, también está escrito en Python.

- **Python para la Educación**

Una de las aplicaciones para la que fue concebido Python en sus principios fue como un lenguaje fácil de aprender. Su creador ha expresado que llegará el día donde la programación se convierta en una asignatura tan importante como las matemáticas y las físicas para los currículos de la enseñanza media⁶.

Universidades como la prestigiosa MIT (Massachusetts Institute of Technology) lo han seleccionado para impartir cursos como Introducción a las Ciencias de la Computación y a la Programación e Introducción a los Algoritmos. En la Universidad de Chicago se utiliza para impartir Introducción a las Ciencias de la Computación 2, y en la Universidad de Jaume de España se usa en Introducción a la Programación.

Se puede ver cómo en algunos centros de estudios superiores importantes ya se viene adoptando el Python como lenguaje, tanto para cursos introductorios como para cursos un poco más avanzado. Esto indica cuánto ha avanzado el lenguaje en este campo y cuáles serán sus proyecciones de adopción en el futuro.

- **Python para la Ciencia**

Hoy en día, los científicos de cualquier rama usan la programación como una herramienta más para la solución de sus problemas. Ellos necesitan que sus herramientas sean simples y eficientes, de modo que se puedan concentrar en los problemas de sus respectivos campos.

Actualmente se puede observar una gran tendencia al uso de Python en grandes centros de investigación como el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) y por parte de científicos en ramas como la Bioinformática, Neurofisiología, Física, Matemáticas, etc. Esto es debido a la disponibilidad de librerías de visualización, procesamiento de señales, estadísticas, álgebra, etc.; de fácil utilización y que cuentan con muy buena documentación.

Los paquetes NumPy (Python Numérico) y SciPy (Python Científico) son pilares para el trabajo científico hoy en día, estos emulan en muchas ocasiones las funciones disponibles por el Matlab (otro de los lenguajes de corte científico existentes) lo que hace más fácil la transición a partir de este.

⁶ Guido van Rossum, Computer Programming for Everybody. A Scouting Expedition for the Programmers of Tomorrow. 1999.

El Toolkit Modular para Procesamiento de Datos (MDP), por ejemplo, ofrece funciones para temas más específicos y avanzados como el Análisis de Componentes Principales y Análisis de Componentes Independientes, muy útiles para el procesamiento de señales digitales.

Otra de las razones de su uso es la existencia de librerías que soportan archivos de intercambio de datos científicos como el netCDF, además de que pueden leer de ficheros de datos generados con Matlab. Esto hace mucho más fácil y estandarizado el intercambio de datos entre la comunidad científica.

La madurez de proyectos de código abierto, como NumPy y SciPy ha dado acceso a un gran número de funciones científicas que compiten en tamaño y velocidad con la bien conocida alternativa comercial Matlab, solidificando el papel de Python en la comunidad científica de Python hoy.

CONCLUSIONES

La programación es considerada por muchos un arte, y como todo arte necesita un lenguaje que permita expresar las ideas de la forma que se quiere. Python es el lienzo que permite reflejar, de forma simple y elegante, las ideas en forma algorítmica. Sus aplicaciones, tanto en la comunidad docente como en la científica, le permitirán aumentar su popularidad y adopción a nivel internacional.

Sirva esta información especialmente a la comunidad cubana, donde hay muchas personas, informáticos o no de titulación, interesadas en dar sus primeros pasos en el mundo de la programación en un ambiente de software libre, pues Python constituye, sin lugar a dudas, una de las mejores variantes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Downey, A.B. (2008). *How to Think Like a Computer Scientist*. Learning with Python, Green Tea Press.
- [2]. Finlay, J. (2006). PyGTK 2.0 Tutorial, Version 2.5. [documento en línea]. <http://www.pygtk.org/pygtk2tutorial/index.html> [consultado: 3 de octubre de 2012].
- [3]. González Duque, R. Python para todos [documento en línea]. <http://mundogeek.net/tutorial-python/> [consultado: 2 de octubre de 2012].

- [4]. Rossum, G. (1999). Computer Programming for Everybody. A Scouting Expedition for the Programmers of Tomorrow.
- [5]. Rossum, G . y Drake, F.L. (2010). The Python Library Reference. Release 2.6.4.
- [6]. Kuchling, A. (1998). Interview with Guido van Rossum [versión electrónica]. *Linux Journal* 55 disponible en: <http://www.linuxjournal.com/article/2959> [consultado: 3 /10/ 2012].
- [7]. O'Reilly Python DevCenter [documento en línea] <http://www.onlamp.com/python> [consultado: 2 /10/ 2012].
- [8]. Peters, T. (2004). The Zen of Python. [documento en línea] <http://www.python.org/dev/peps/pep-0020/> [consultado: 3 /10/ 2012].
- [9]. Sitio Oficial de Python (www.python.org) [consultado: 3 /10/ 2012].

Síntesis Curricular de los Autores

Ing. Ivet Challenger-Pérez Ingeniero Informático. Profesor. Dpto. de Informática.

Investigaciones realizadas: Sistema para la gestión de la información de los medios audiovisuales.

Ha impartido posgrado como: Ingeniería de Software (UML), Introducción a la Plataforma de Aprendizaje a Distancia (Moodle) para administradores.

Cursos de posgrado recibidos: Seguridad Informática, Oficina para la Seguridad de las Redes Informáticas, Software Libre, Metodología de la Investigación Científica, Diplomado Docencia Universitaria

Participación en eventos: Tercer Taller Provincial de Informatización de la Sociedad, Holguín, V Conferencia Científica Internacional Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya",

Ing. Yanet Díaz-Ricardo Ingeniero Informático. Profesor. Dpto. de Informática.

Investigaciones realizadas: Sistema para la Gestión de Contratos Económicos en la Zona Oriente Norte, ECASA S.A.

Cursos de posgrado impartidos: Curso Introductorio a la Plataforma de Aprendizaje a Distancia (Moodle) para administradores, Ingeniería de Software (UML), Instalación, configuración y administración del CMS Joomla.

Cursos de posgrado recibidos: Seguridad Informática, Oficina para la Seguridad de las Redes Informáticas, Dirección y Administración, Metodología de la Investigación Científica, Diplomado Docencia Universitaria

Participación en eventos: IV Conferencia Científica Internacional, V Conferencia Científica Internacional, XVI Forum Municipal de Ciencia y Técnica, Relevante, XVI Forum Provincial de Ciencia y Técnica, Destacado.

Ing. Roberto Antonio Becerra-García

Profesor instructor en la Facultad de Matemática e Informática e imparte Arquitectura de Computadoras a estudiantes de Ingeniería Informática. Graduado en Ingeniería Informática, cursa la maestría de "Matemática e Informática Aplicada a la Administración" y el doctorado curricular "Modelos Matemáticos y Aplicaciones". Su área de investigación se encuentra alrededor del procesamiento de datos biomédicos, en específico de señales electrooculográficas. Como resultado de sus investigaciones ha realizado una aplicación de procesamiento de registros electrooculográficos siendo autor de varios artículos científicos en este campo.

Institución de los autores

Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya"

Fecha de Recepción: 14/01/2013

Fecha de Aprobación: 12/12/2013

Fecha de Publicación: 16/04/2014

Diseño de un Sistema de Adquisición y Procesamiento de la Señal de ECG basado en Instrumentación Virtual

Ing. Roberto Andrés Bistel Esquivel; Ing. Ariel Fajardo Márquez

*Centro de Investigaciones en Microelectrónica, CIME. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.
La Habana. Cuba.*

RESUMEN / ABSTRACT

El presente trabajo expone los principales elementos de diseño e implementación de un Sistema de Adquisición y Procesamiento de la Señal de ECG. La herramienta emplea como herramienta de programación *LabVIEW 2011* y como elemento de *hardware* una tarjeta de adquisición de datos de la Serie M de *National Instruments*. El sistema ha sido evaluado a través de un Generador de Señales de ECG, que es capaz de reproducir diferentes formas de ondas para calibración de electrocardiógrafos de acuerdo a las recomendaciones de la Comisión Electrotécnica Internacional (*IEC*). La simplicidad, robustez del diseño, bajos costos y adaptabilidad de los módulos implementados para la adquisición de otras señales biomédicas, como la de Electroencefalografía, permiten contar con una herramienta muy útil en tareas de investigación y puesta en marcha de prototipos.

Palabras claves: electrocardiografía (ECG), Instrumentación Virtual, *LabVIEW*, Procesamiento Digital de Señales (PDS), Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD).

This paper describes a system using LabVIEW 2011 for ECG signal acquisition, filtering, processing and analysis. M series multifunction data acquisition cards are used for the acquisition of ECG signals and the appropriate software NI-DAQ. The system is evaluated with a custom ECG signal generator, with different calibration signals for electrocardiography indicated in the rules of the International Electrotechnical Commission (IEC). The simplicity, low cost and advantages of this new system respect to classical ECG acquisition allows for the implementation of the tool in other biomedical signal processing applications such as Electroencephalography (EEG).

Key words: electrocardiography – ECG, data acquisition card – DAQ device, digital signal processing (DSP) *LabVIEW*, Virtual Instrumentation.

Design of a System for Acquisition and Processing ECG’s Signals based on Virtual Instrumentation.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares (ECV) están entre los factores más frecuentes de morbilidad y mortalidad en la población activa. La tendencia actual es al crecimiento, no solo en las grandes economías, sino también en los países subdesarrollados. Actualmente en Cuba son la segunda causa de muerte, aunque en los últimos años representaban el primer lugar^[1].

La señal electrocardiográfica es una variable electrofisiológica que constituye un método de apoyo al diagnóstico clínico y permite obtener indicadores confiables del estado anatómico – funcional del Sistema Cardiovascular. Se materializa mediante dos

electrodos o más colocados sobre la piel en puntos distintos del tórax, obteniéndose de esta forma las correspondientes derivaciones electrocardiográficas.

La actividad eléctrica del corazón es medida por el electrocardiógrafo y plasmada en un electrocardiograma (ECG), que normalmente registra una serie de ondas según los distintos potenciales eléctricos que se forman en el corazón durante un latido. Su ventaja respecto a otras técnicas radica en que no es invasivo y es la forma más sencilla de obtener información de esa excitación. Hoy en día, es el parámetro electrofisiológico que se registra y analiza con mayor frecuencia en los procesos de asistencia médica, ya sea, de carácter primario, urgencias o dentro de la actividad de cirugía y estancia en unidades hospitalarias^[2] - [3].

Un trazado de ECG normal se muestra en la Figura 1. Se observa una onda P, un complejo QRS y una onda T. De forma general se considera que en un individuo normal deben estar presentes las siguientes ondas, intervalos, complejos y segmentos:

- Onda P: Inicio de un ciclo o período cardíaco. Dura entre 0,09 s y 0,11 s. Tiene una amplitud aproximada de 0,25 mV.
- Intervalo P-R: Espacio comprendido entre el fin de la onda P y el inicio del complejo QRS. Dura entre 0,11 s y 0,20 s.
- Complejo QRS: Compuesto por una despolarización eléctrica del músculo cardíaco, conocida como depresión u onda Q; una rápida repolarización, que constituye el pico más elevado de la señal, onda R; y otra inversión de la polaridad, dada por la depresión S. Es frecuente que el complejo QRS tenga las ondas separadas: Q, R y S, aunque no siempre ocurre así. Dura entre 0,07 s y 0,11 s. La onda R llega a alcanzar alrededor de 1,60 mV; mientras que la Q es cerca del 25 % de la amplitud de R.
- Intervalo Q-T: Posee una duración entre 0,35 s a 0,44 s.
- Segmento ST: Comprendido entre el fin del complejo QRS y el inicio de la onda T. Suele ser isoeléctrico en los ECG normales. Tiene un intervalo de tiempo de entre 0,05 s a 0,15 s.
- Onda T: De igual polaridad al complejo QRS. Alcanza entre 0,1 a 0,5 mV^[2].

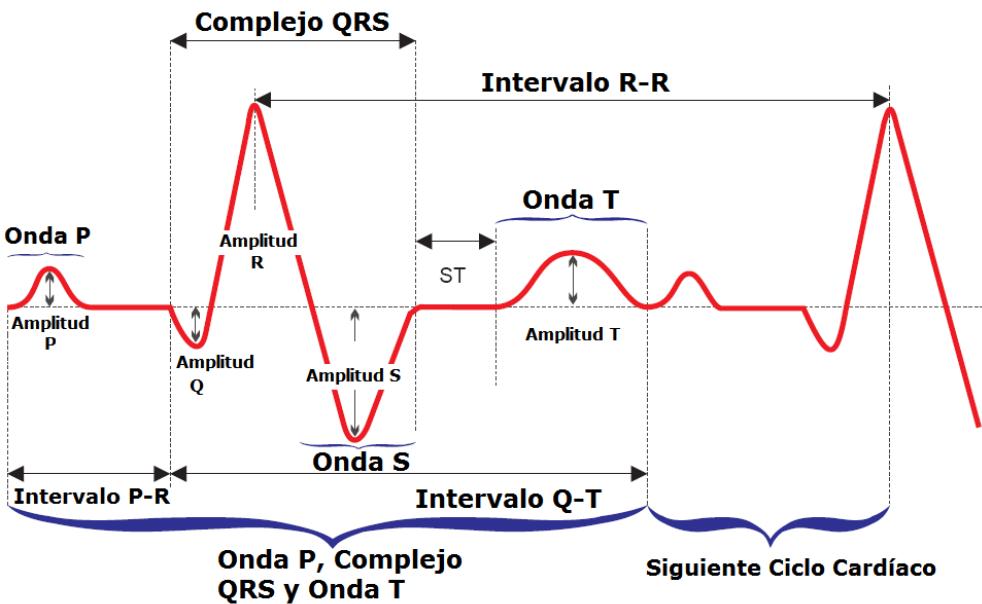


Figura 1 El trazado de ECG y sus formas de ondas más representativas.

Las alternativas de adquisición y acondicionamiento de señal en sistemas comerciales electrocardiográficos son diversas. Típicamente se utilizan en las etapas frontales amplificadores de instrumentación, combinaciones de filtros analógicos de señal (paso alto y paso bajo) y un microcontrolador que incorpore un convertidor A/D de elevada resolución. El microcontrolador debe tener altas tasas de procesamiento de señal, por lo que se recomienda que sea del tipo DSP. También debe manejar una memoria de datos no volátil, así como permitir capacidades de visualización, conexión por interfaz a PC, transmisión de señales u otras potencialidades^{[2]-[4]}.

En este trabajo se presenta un sistema de procesamiento para señales electrocardiográficas, basado en el empleo de una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6212 y una herramienta de software diseñada en *LabVIEW 2011* sobre plataforma *Windows®*. La misma consta de etapas de ajuste de nivel, filtrado digital de señal y detección automática de los complejos QRS presentes en la señal de ECG adquirida para el cálculo de la Frecuencia Cardíaca. Además implementa un bloque para la gestión de la información resultante del análisis de la señal y la complementaria del sujeto en estudio, una vez que la misma es almacenada en el disco duro de la *PC*, a partir de la identificación del individuo o la fecha de registro.

El sistema ha sido validado a través del empleo de un generador-simulador de señales de calibración para electrocardiografía [5]. La fácil implementación y reducidos costos de inversión, posibilitan la expansión del módulo a la adquisición y procesamiento de otros biopotenciales, como los correspondientes a electroencefalografía (EEG) y electromiografía (EMG).

2. MATERIALES Y METÓDOS

El desarrollo de la herramienta de *software* para el análisis de la señal de ECG se basó en una primera etapa en determinar las principales características de la variable de interés. A su vez, las potencialidades a incorporar y métodos de procesamiento a utilizar. De esta forma se identificó que el sistema debía poseer los siguientes requisitos:

1. La señal a adquirir tiene una amplitud comprendida entre ± 5 V. Se debe a que se emplea un canal de instrumentación analógico para ECG con estas características. Solamente se toma señal de una derivación electrocardiográfica, típicamente la derivación II.
2. El ancho de banda de la señal será hasta los 150 Hz, con posibilidad de limitarlo a 17 Hz, 40 Hz ó 100 Hz. La frecuencia de corte a las bajas es fijada invariablemente en 0,05 Hz. La Asociación Americana del Corazón (AHA, del inglés *American Heart Association*) recomienda 0,05 Hz, debido principalmente a la distorsión de la información ligada al segmento ST, que se produce con frecuencias de corte por encima de 0,1 Hz [6] – [8]. La Figura 2 constituye una representación del ancho de banda empleado en electrocardiografía.

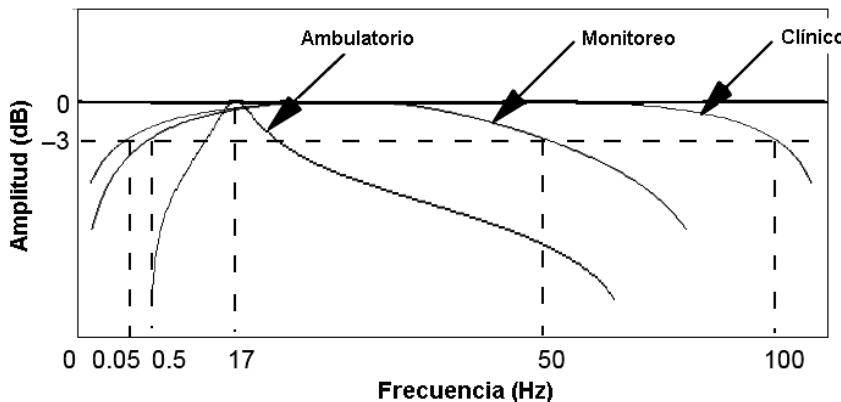


Figura 2 Representación del ancho de banda usado en Electrocardiografía.

3. La frecuencia de muestreo tiene que ser superior a la utilizada usualmente en sistemas ambulatorios de registro de señales biomédicas, más conocidos como Holter, que es de 128 Hz. La conversión analógica - digital tendrá entonces dos valores posibles: 500 muestras/s ó 1000 muestras/s, ambas con una resolución mínima de 12 bits. Con ello se garantiza el cumplimiento del Teorema de Nyquist, aún para la frecuencia de corte a las altas de 150 Hz. Sin embargo, trae consigo un aumento del archivo de registro y que estos contengan un mayor nivel de ruido [2] – [4], [6] – [8].
4. Durante el registro, es necesario graficar la señal en formato tensión contra tiempo, donde ante una expansión del canal de entrada cada una de las derivaciones se identificará por un color específico.
5. Una vez cumplido el intervalo de tiempo establecido para la adquisición o se desee interrumpir la prueba, se debe crear un fichero en formato texto (*.txt) *ASCII* para *WINDOWS®* tabulado en dos columnas que contengan el tiempo y amplitud de la señal. Cada línea (fila) será terminada por un retorno de carro (ENTER).
6. Como modos de configuración por el usuario serán accesibles la frecuencia de muestreo, frecuencia de corte de los filtros digitales de señal, derivaciones a graficar, tiempo total de adquisición, nombre y localización en memoria del fichero a guardar. Además, posibilidad de incorporar en el mismo la fecha y hora, y otros parámetros (ejemplo: nombre y / o número del sujeto bajo estudio, edad, talla, peso corporal, u otras).

7. Permitir la visualización remota de las gráficas. También el análisis de registros anteriormente almacenados.

Con estos requisitos pre establecidos, se determinó la viabilidad de utilizar la tarjeta de adquisición de datos *NI-USB 6212*. Esta es una *DAQ MIO* (Multifunción) de la Serie M con 16 entradas analógicas (16 bits, 400 kS/s, pueden ser configuradas en cuatro rangos de entrada programable: ± 0.2 V a ± 10 V), 2 salidas analógicas (16 bits a 250 kS/s) y energizada por bus *USB* para una mayor movilidad. De la misma será utilizada solamente un entrada analógica, colocada en modo *RSE* (*Reference Single-Ended input*). Se destaca que usando esta propia *DAQ* se contemplan las futuras expansiones del módulo de adquisición analógico. En la Figura 3 se presenta el diagrama en bloques simplificado del sistema implementado [9].

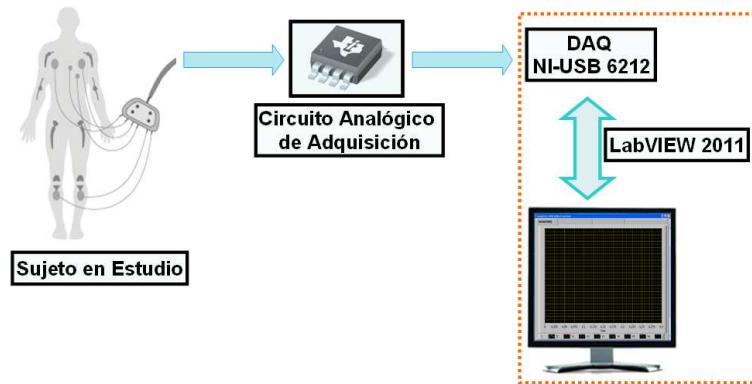


Figura 3 Diagrama en bloques simplificado del Sistema de Adquisición y Procesamiento de la Señal de ECG.

2.1 INTERFAZ DE USUARIO (PANEL FRONTAL) DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE ECG.

La interfaz de usuario del sistema se conformó de forma tal que permitiese un fácil acceso a los controles. Los asociados con la escritura y lectura de los registros se ubican en el Menú de Archivo, donde se puede modificar la ruta de acceso a los mismos, agregarles la fecha y hora en que se crea el fichero y los datos del sujeto en estudio.

La señal adquirida se muestra en un gráfico independiente a la señal ya procesada. Ambas son visualizadas en el dominio del tiempo, con función habilitada de autoescala. El Menú de Visualización consta de botones con los que se realiza la función de acercamiento ("zoom") en el eje X de tiempo y / o eje Y de amplitud. El Menú de Herramientas dispone de los controles necesarios para la selección del tipo de filtro a utilizar, ajuste de la frecuencia de corte y muestreo. Otros controles e indicadores están presentes en la Interfaz de Usuario, como el que muestra el Valor de la Frecuencia Cardíaca. En la Figura 4 se observa el Panel Frontal del Sistema.

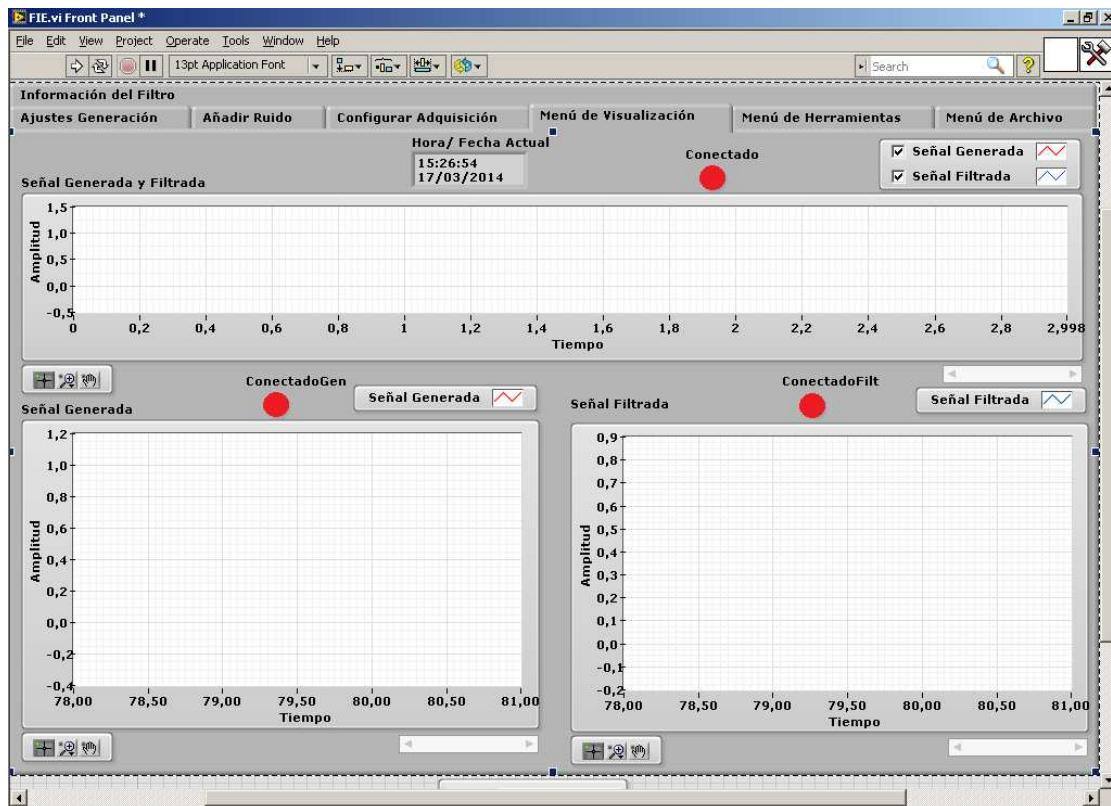


Figura 4 Panel Frontal del Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG.

2.2 DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE ECG.

Como cualquier programa diseñado en *LabVIEW* en el Diagrama en Bloques es dónde se implementan las funciones que el mismo va a realizar. Se optó por realizar el mismo a través de *subVI* que garantizan la organización, legibilidad, portabilidad y modularidad del programa.

Para el módulo implementado se dispuso que el análisis y cálculo de la Frecuencia Cardíaca fuera a través de las ondas del complejo ventricular QRS. La Frecuencia Cardíaca está determinada por la ocurrencia de los complejos QRS, los cuales se caracterizan por un amplio espectro morfológico. La Figura 5 ilustra el proceso general de obtención de la serie RR, que no es más que la serie temporal que indica el intervalo entre dos QRS sucesivos obtenidos a partir de un registro electrocardiográfico [10].

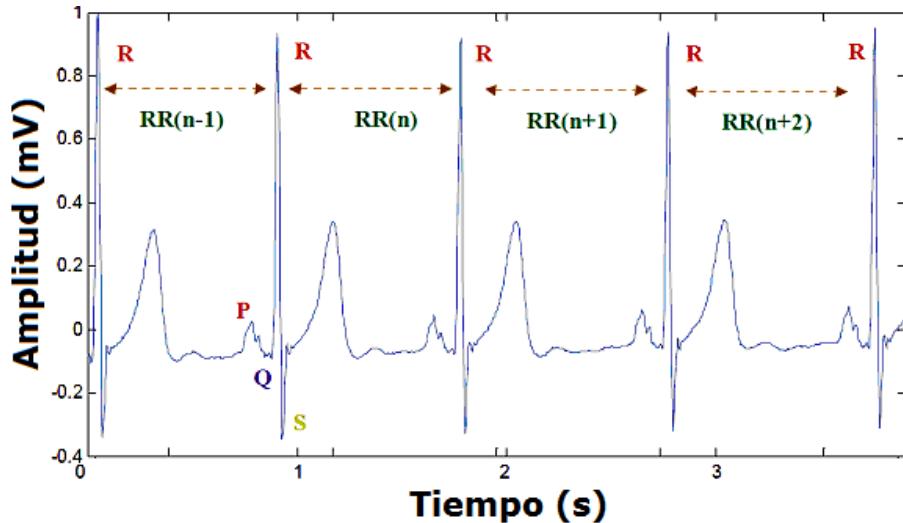


Figura 5 Proceso de obtención de la serie RR a través de un registro de ECG.

Para detectar los complejos QRS se toma la mayor amplitud de la señal, correspondiente al punto R, discriminando las ondas P y T, que tienen un nivel de tensión inferior al complejo QRS. A su vez, como todas poseen igual polaridad, permite realizar sus características frente al ruido de electromiografía (EMG), biopotencial correspondiente al movimiento de los músculos y que tiene un ancho de banda de 20 Hz a 15 kHz. Además se aislan los ruidos acoplados, comúnmente conocidos como artefactos de movimiento y que se deben a la interfaz electrodo-piel; así como los ocasionados por la deriva de la línea de base, dada por la respiración, con un espectro de frecuencias aproximado de 0,5 Hz. La breve duración de las ondas de un ECG hace que tengan puntos de inflexión muy precisos que se repiten latido a latido. Como la distancia entre dos complejos QRS no siempre es constante, se emplea el promedio de todos los períodos capturados^{[11]-[14]}.

Por tanto, se colocan dos niveles de tensión como parámetros de comparación. El primero es para identificar el inicio de un complejo QRS y el otro para el final del mismo. El intervalo de tiempo se toma hasta 150 ms ya que los complejos QRS no sobrepasan normalmente esta duración.

Para el cálculo de Frecuencia Cardíaca, conociendo que el período es inversamente proporcional a la frecuencia, si se tiene el intervalo de tiempo transcurrido entre dos complejos QRS consecutivos (dos latidos) se puede conocer sin mayores problemas la frecuencia. El intervalo normal que separa dos complejos QRS sucesivos en un adulto es de aproximadamente unos 830 ms, en tal caso, la Frecuencia Cardíaca típica es de unos 72 latidos por minuto (*bpm*, del inglés *beats per minute*)^{[2]-[4]}.

El sistema de filtros diseñado cuenta con un bloque que permite eliminar la componente de corriente directa (DC) de la señal de ECG, para así obtener la línea base de la misma. Para lograrlo se usó un filtro no lineal (tipo *IIR*), empleando la mediana enventanada con frecuencias de corte en 0,15 Hz y 0,3 Hz. Así se aprovechan las características ventajosas de los filtros *IIR* para el ruido impulsivo respecto a los lineales^{[15]-[19]}.

Los restantes módulos de filtrado realizan procesamiento mediante etapas tipo *FIR* o *IIR*, para eliminar ruidos asociados a la interferencia de línea de 50 ó 60 Hz (seleccionable por el usuario), contracciones musculares, ruido de contacto de los electrodos, artefactos por movimiento, u otros. La Figura 6 muestra la distribución espectral de las diferentes señales y ondas presentes en un registro de ECG^[10].

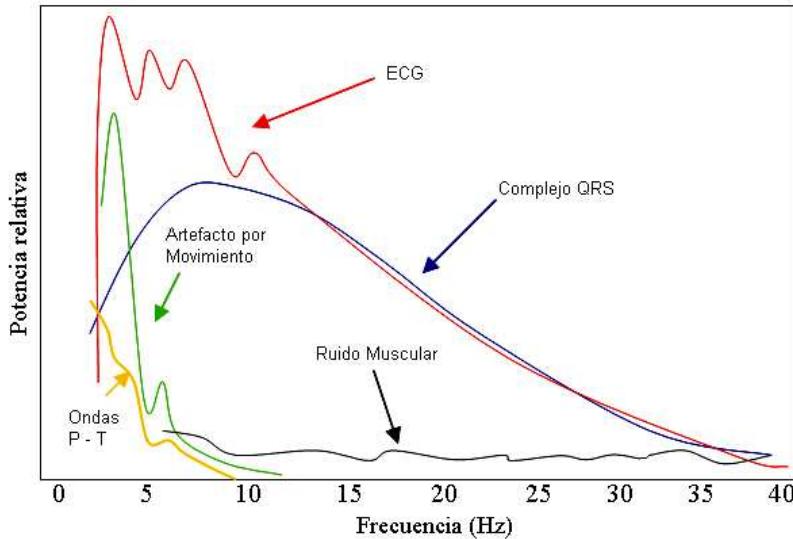


Figura 6 Distribución Espectral de las diferentes señales y ondas presentes durante un registro electrocardiográfico.

Los otros *subVI* tienen como función facilitar la lectura y escritura de los ficheros de datos, y la visualización de las señales. En la Figura 7 se aprecia una sección del programa que ejecuta la selección de los canales de entrada. Se presenta para dos canales de entrada simultáneos y con gráficos de salida independientes uno del otro, pero es fácilmente escalable a un mayor número de canales.

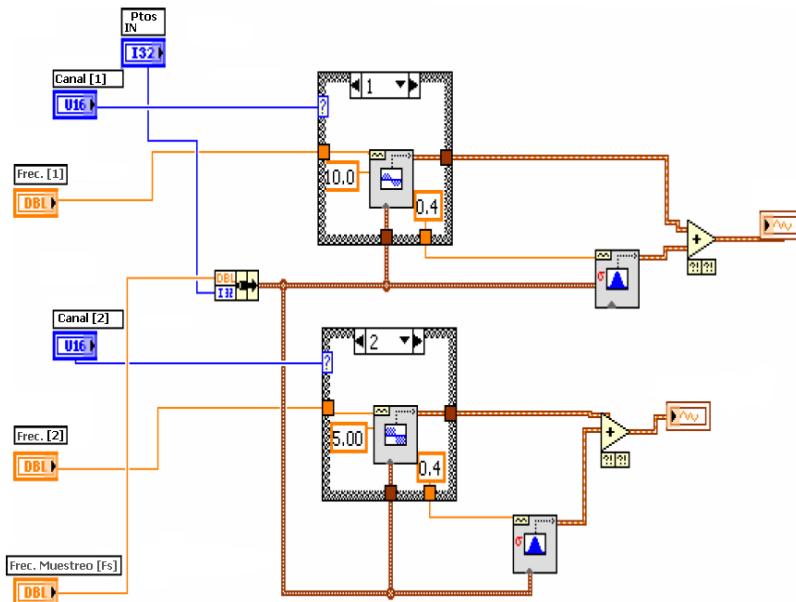


Figura 7 Estructura implementada para la adquisición de dos canales de forma simultánea.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG se ha empleado como etapa previa de una investigación relacionada con el Registro de Biopotenciales en Pequeños Mamíferos. Dado que aún no se dispone de todos los elementos necesarios para la adquisición directa de la señal de ECG en estas especies, como validación de la herramienta diseñada se utilizó “Generador de Señales CALECG V2”.

Este es un instrumento virtual que consta de módulos para la generación de las señales de calibración para ECG dispuestas en la norma internacional *IEC 60601-2-51* y señales de ECG sintéticas. Para las pruebas se empleó una PC con *Microsoft Windows® XP Professional* (Versión 2002, *Service Pack 3*), procesador *DualCore* a 2,4 GHz y 1 GB de *RAM*. La Figura 8 representa la conexión realizada para las pruebas desarrolladas al Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG^[5].

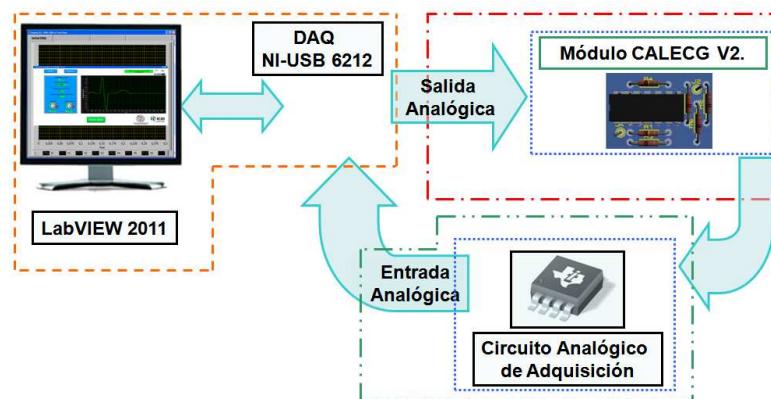
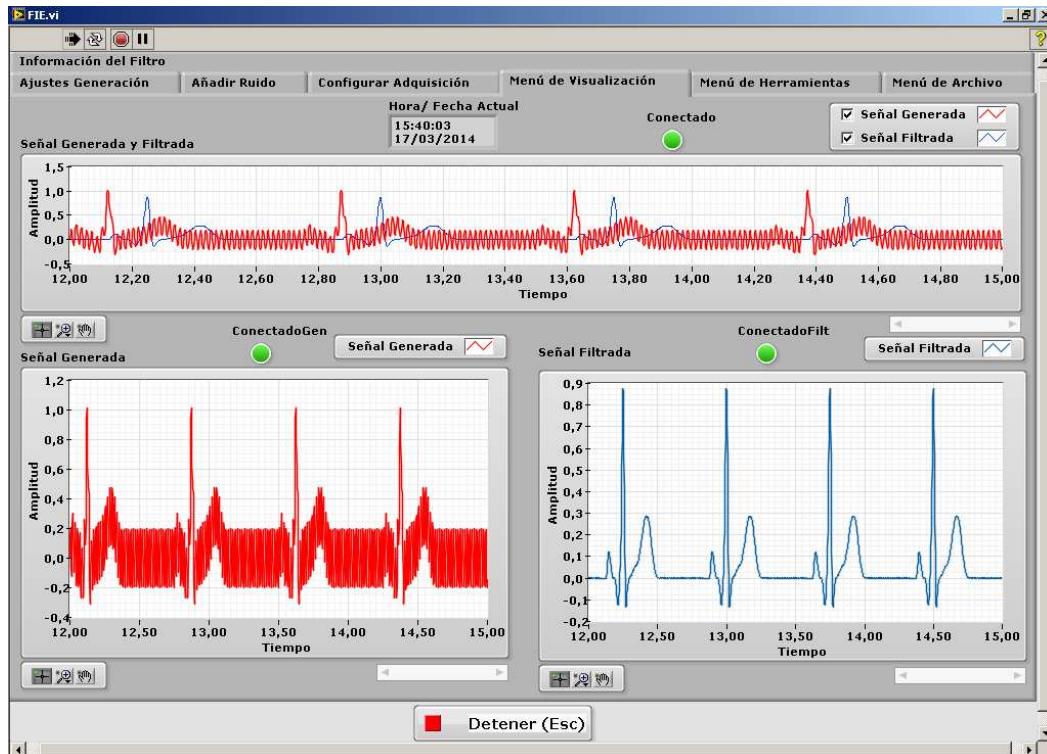


Figura 8 Esquema de conexión implementado para la validación del Sistema de Adquisición y Procesamiento de la Señal de ECG.

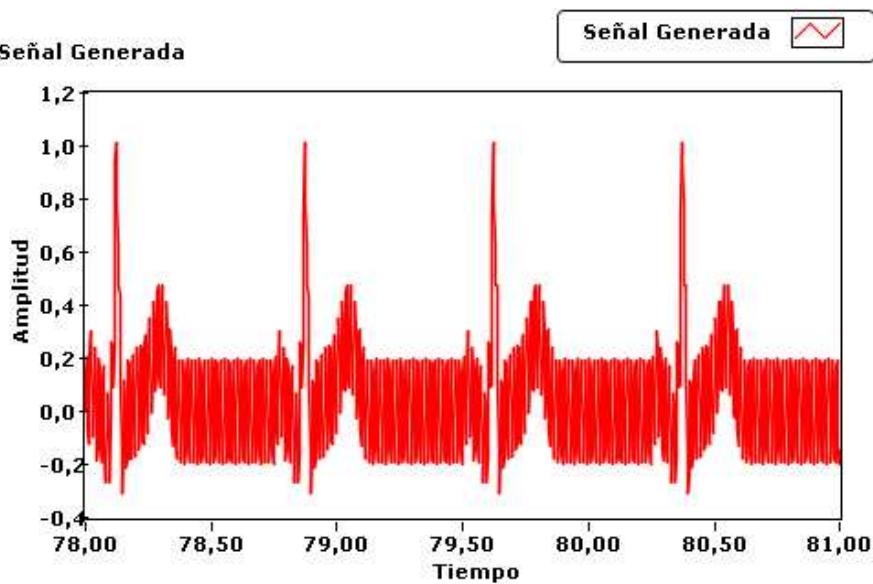
El software adquiere y procesa de forma correcta la señal amplificada por el circuito analógico. La señal graficada tiene un total de 10000 muestras, que corresponden a 20 segundos a la frecuencia de muestreo mínima de 500 Hz. Como ya se ha explicado puede ser ampliado para observar con más detalle las ondas componentes del ECG.

El filtro supresor de banda (*IIR*, orden 8, tipo Bessel, con frecuencia de corte a las bajas de 58 Hz y las altas de 62 Hz) implementado para eliminar la interferencia de línea aporta muy buenos resultados. La reducción de otros ruidos contenidos en la señal se logró de forma más eficiente colocando una cascada de dos filtros para conformar un pasa banda. La primera etapa es un paso alto lineal (tipo *FIR*) con frecuencia de corte en 0,05 Hz. La segunda, es un paso bajo *FIR* con frecuencia de corte en el límite impuesto por el usuario, por ejemplo 40 Hz. Estos bloques acentúan el filtrado realizado en el módulo analógico de acondicionamiento.

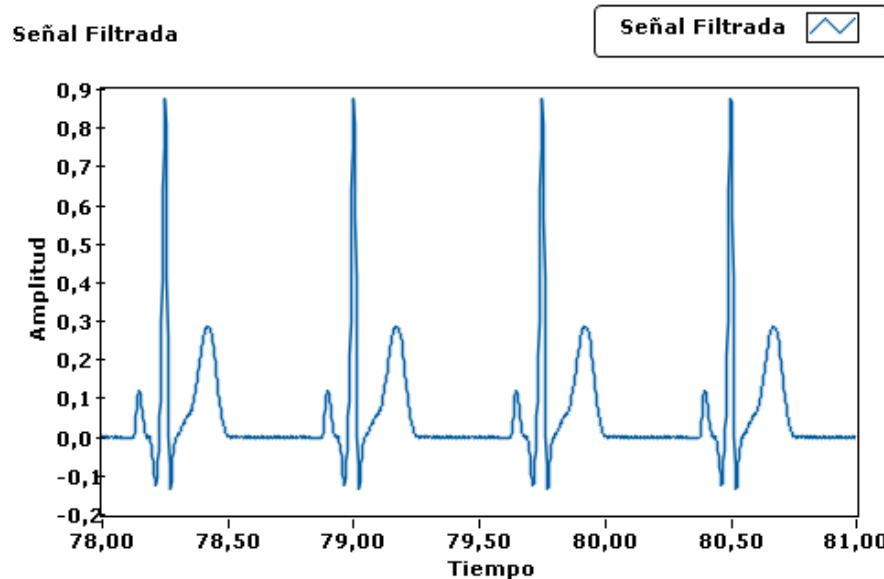
A continuación se ubica un filtro promediador por ventana deslizante Hanning. La forma de realizarlo es separando las componentes de frecuencias inferiores (ondas P y T) que son las que tienen mayor amplitud de ruido, de las componentes de alta frecuencia (complejo QRS) que prácticamente no presentan ruido. Todos estos procesos se realizan en tiempo real. En la Figura 9 se presentan los resultados del *subVI* encargado del filtrado de señal.



a)



b)



c)

Figura 9 a) Menú de Visualización de “Sistema de Adquisición y Procesamiento de la Señal de ECG”. b) Señal de ECG sintética generada hacia la salida analógica de la DAQ por “Generador de Señales CALECG V2”. c) Señal de ECG adquirida y procesada por “Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG”. Nota: La imágenes b) y c) fueron exportadas desde los gráficos correspondientes de LabVIEW.

La funcionalidad de visualizar y transmitir vía LAN la señal adquirida, filtrada y cantidad de latidos por minuto se desarrolló con las funciones de *LabVIEW Web Publishing Tool* y las de *DataSocket* de la Paleta *Data Communication*. El archivo de datos ocupa un espacio aproximado en memoria de 12 kB, para una frecuencia de muestreo de 500 Hz, intervalo mínimo de adquisición de 10 segundos y registro de una sola derivación.

Para validar el algoritmo de Cálculo de la Frecuencia Cardíaca a partir de la detección de los complejos QRS se emplearon las Señales de Calibración (CAL) dispuestas en el Estándar Internacional *IEC 60601-2-51*. Estas poseen diferentes amplitudes máximas para el complejo QRS (primeros dos números en la nomenclatura empleada). Las señales CAL se construyen de forma tal que se definan todos los segmentos e intervalos de un ECG (P, Q, R, S y T). En la Figura 10 se observan las formas de ondas empleadas para obtener la exactitud asociada al Cálculo de la Frecuencia Cardíaca [6].

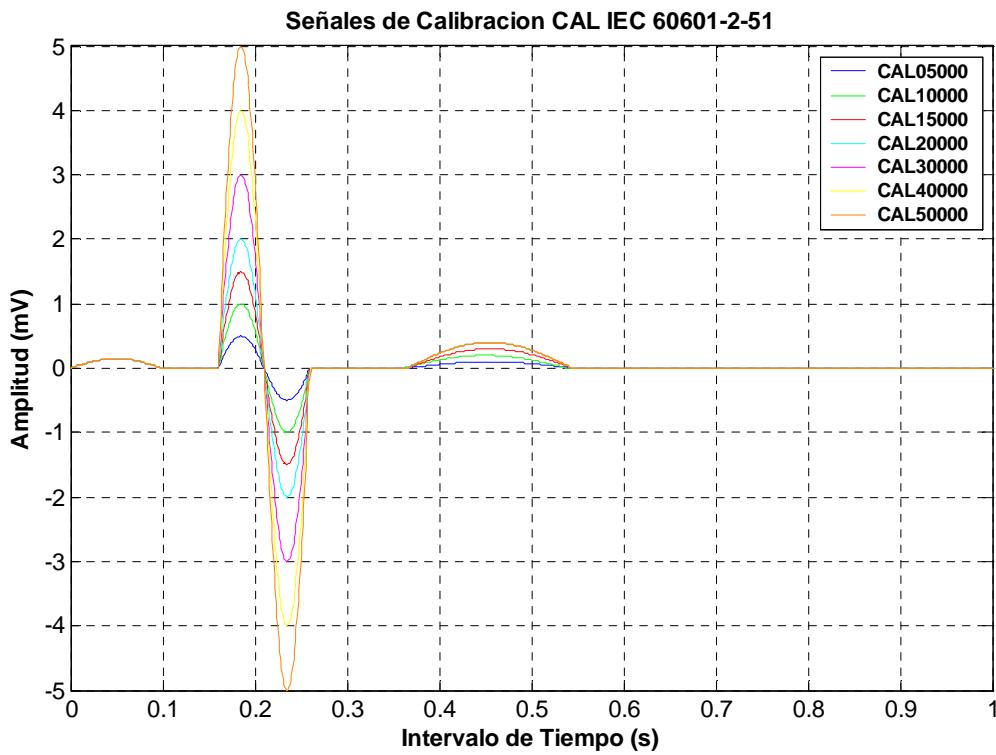


Figura 10 Señales de Calibración IEC 60601-2-51 utilizadas para el Cálculo de la Frecuencia Cardíaca.

La Tabla 1 recoge los valores porcentuales de las pruebas realizadas con seis señales de calibración IEC 60601-2-51 para diferentes frecuencias o latidos por minuto generados. Cada una de las pruebas fue realizada cinco ocasiones con intervalos de duración del ensayo preestablecidos de uno, tres y cinco minutos con una frecuencia de muestreo en la adquisición de 1000 Hz. No le fue añadido ruido a las señales generadas.

Tabla 1 Valores porcentuales (%) de complejos QRS detectados para diferentes Señales de Calibración IEC 60601-2-51.

Señal CAL IEC 60601-2-51	Frecuencia Cardíaca Generada (bpm)	% de Latidos Adquiridos (%)
CAL 05000	60	93,6
	80	93,3
	100	93,1
CAL 15000	60	93,8
	80	93,6
	100	93,3
CAL 20000	60	94,3
	80	94,1
	100	93,9
CAL 30000	60	94,8
	80	94,6
	100	94,2
CAL 40000	60	95,4
	80	95,3
	100	94,9
CAL 50000	60	95,7
	80	95,7
	100	95,4

En la Tabla 1 se aprecia que un aumento de la frecuencia original de generación de las señales CAL, que es de 60 bpm, trae aparejado una disminución de la exactitud. El indicador que muestra el valor de la Frecuencia Cardíaca es actualizado cada doce (12) segundos de adquisición de señal, ya que es donde el algoritmo aporta los menores errores. En ningún momento se alcanzaron resultados superiores de latidos adquiridos que los generados.

Los errores más elevados se obtuvieron para las señales de menor amplitud del complejo QRS, como son las señales CAL05000 y CAL15000. Además trabajar con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz, es un factor que condiciona de forma evidente la precisión en la determinación de la posición de los latidos, y en consecuencia de la serie RR que conduce al Cálculo de la Frecuencia Cardíaca.

El problema de la elección de una frecuencia de muestreo óptima para la determinación de la secuencia RR se realiza siguiendo recomendaciones de expertos. Para localizar las crestas R de la señal cardíaca, se han publicado algunos estándares voluntarios, satisfactorios en términos de relación señal/ruido, rechazo a modo común y ancho de banda [7], [20] – [24].

Por tanto, una forma directa de disminuir el error por mala determinación de la serie RR es elevar la razón de muestreo a más de 1000 Hz. Esto se puede lograr en la aplicación final de Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG, ya que en esta no estaría incluida la generación simultánea de las señales CAL.

Es evidente que el trabajo paralelo de los Instrumentos Virtuales “Generador de Señales CALECG V2” y Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG, trae consigo que las tareas se realicen con pérdidas de la capacidad de trabajo en tiempo real. La simultaneidad de estos dos VT's que consumen recursos propios de la interfaz USB donde está conectada la DAQ NI-USB 6212 y el trabajo de otros servicios del Sistema Operativo Windows® de la PC donde se ejecutaron las pruebas disminuyen el rendimiento significativamente.

Otras técnicas de identificación como las “wavelets” permitirían optimizar el algoritmo de detección de la serie RR, aumentando la fiabilidad del sistema. Las “wavelets” se encuentran implementadas en LabVIEW y no traen una elevación considerable del costo computacional.

Los estándares internacionales que incluyen el Cálculo de la Frecuencia Cardíaca permiten un mínimo de exactitud del 90%, por lo que en este aspecto el Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG se comportó de forma correcta, al obtenerse un valor promedio de 94,38 %. Sin embargo, resulta necesario adicionar ruido a las señales para comprobar las opciones de

filtrado de señal junto al cálculo de la frecuencia cardíaca y comprobar el método utilizando archivos de las bases de datos *MIT-BIH* y *CSE MULTILEAD ATLAS*, que incluyen un gran número de registros clasificados por patologías, grupos de edades y sexo. Las señales que se obtienen de *MIT-BIH* y *CSE* sirven para caracterizar al electrocardiógrafo en cuanto a sus posibilidades diagnósticas, obteniéndose un criterio de clasificación de los algoritmos de detección del sistema diseñado^{[6], [13], [25] – [29]}.

4. CONCLUSIONES

El Sistema de Adquisición y Procesamiento de Señales de ECG permite visualizar de forma correcta la derivación electrocardiográfica adquirida por la *DAQ*. Mediante la utilización de la *NI-USB 6212* se obtiene un sistema de elevada portabilidad y con características técnicas superiores a las especificaciones internacionales. Las recomendaciones de las agencias reguladoras y las normas propias de sistemas para ECG, disponen que el conversor A/D tiene que ser superior a 8 bits y la frecuencia de muestreo por canal sea como mínimo de 500 Hz^{[2] – [4], [9], [14]}. En el Sistema diseñado estos valores son 12 bits y 1000 Hz, respectivamente. La facilidad de aumentar el número de canales y frecuencia de muestreo en las secciones correspondientes del *software* en *LabVIEW*, también justifican el empleo de esta tarjeta de adquisición de datos. Además, realizando pequeñas modificaciones a los parámetros pre-configurados es posible procesar otras señales biomédicas, como son las de EEG, EMG, Tensión Arterial y Temperatura.

La señal procesada a través de los filtros digitales implementados es morfológicamente correcta. El Módulo de Cálculo de Frecuencia Cardíaca aporta resultados favorables, comportándose con un valor promedio de exactitud de 94,38 %, que es superior al 90 % establecido por las normas internacionales. Los resultados del procesamiento de la señal, junto a informaciones adicionales del sujeto bajo estudio se almacenan en un archivo de texto, permitiendo un análisis más complejo cuando el operador lo deseé. Los datos se pueden importar a otras herramientas informáticas, como *Excel* o *MatLAB*, para realizar procesamientos estadísticos u otros.

Es importante destacar que los módulos diseñados solamente utilizan las funciones básicas disponibles en *LabVIEW*. Las herramientas de *National Instruments NI LabVIEW Biomedical Toolkit 2012* y *NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II (NI ELVIS II)* no son empleadas. El coste inicial de *LabVIEW Professional* es \$ 4949.00 USD, por lo que no existen licencias registradas válidas del distribuidor en nuestro país. Por tanto, no se admite la descarga gratuita de los sistemas mencionados y resulta prácticamente prohibitivo a nivel de investigaciones y desarrollo de prototipos asumir el costo de ellos. Actualmente, existen a nivel internacional otras herramientas para el análisis de señales biomédicas, pero sus precios son superiores a los \$ 650.00 USD.

REFERENCIAS

1. **República de Cuba. Ministerio de Salud Pública.** Dirección Nacional de Registros Médicos y Estadísticas de Salud. "Anuario Estadístico de Salud 2012." pp. 12, 31. ISNN 1561-4425. La Habana. Abril de 2013.
2. **Berbari, E. J.** "Principles of Electrocardiography." In *The Biomedical Engineering Handbook*. Second Edition. Chap.: 13. Ed.: Bronzino, Joseph D. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC. ISBN: 0-8493-0461-X. 2000.
3. **Nazeran, H.** "Electrocardiography, Computers in" in *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*. Second Edition. Vol. 3. Ed.: Webster, J. G. Hoboken. pp. 34-53. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 13 978-0-471-26358-6. 2006.
4. **Clifford, Gari D.; and Oefinger, Matt B.** "ECG Acquisition, Storage, Transmission, and Representation." in *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*. Ed.: Clifford, Gari D; Azuaje, Francisco; and McSharry, Patrick E. Chap.: 2. pp. 27-53. Boston, USA: Artech House, Inc. ISBN: 13: 978-1-58053-966-1. 2006.
5. **Bistel, Roberto A.; Fajardo, Ariel; Fernández, Arlem; Valdés, Enrique E.** "Diseño de un Instrumento Virtual para la Calibración de Sistemas Electrocardiográficos" Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones (RIELAC). Vol. XXXIV 2 / 2013 p.19-35. Mayo – Agosto. ISSN: 1815-5928.
6. **Bistel, Roberto A.** "Diseño de un Instrumento Virtual para la Calibración de Sistemas Electrocardiográficos" Tesis de Diploma para Optar por el Título de Ingeniero en Biomédica. Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME) – Instituto Central de Investigación Digital (ICID). Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPIAE). La Habana, Cuba. 2012.
7. **Bailey, JJ; Berson, AS; et al.** "Recommendations for standardization and specifications in automated electrocardiography: bandwidth and digital signal processing. A report for health professionals by an ad hoc writing group of the Committee on Electrocardiography and Cardiac Electrophysiology of the Council on Clinical Cardiology, American Heart Association." Circulation. 81 (2): 730-739. Print ISSN: 0009-7322. Online ISSN: 1524-4539. American Heart Association. 1990.
8. **Webster, John G.** "Medical Instrumentation Amplification and Design." Second Edition. Chap.: 1, 4, 6. Boston, USA pp. 21, 175, 321. ISBN: 0 – 395 – 59492 – 8. 1992.
9. **INTERNATIONAL STANDARD, IEC 60601-2-25.** "Medical electrical equipment – Part 2-25: Particular requirements for the basic safety and essential performance of electrocardiographs." Second Edition. IEC 60601-2-25:2011. Geneva. October 2011.

10. **National Instruments Corporation.** "NI USB-621x Specifications." Department of Technical Communications. Austin, Texas. USA. March 2008.
11. **Sánchez Morillo, Daniel.** Procesado y Transmisión de Señales Biomédicas para el Diagnóstico de Trastornos y Enfermedades del Sueño. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Tecnología Electrónica y Electrónica. Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz. Febrero 2008.
12. **Kántoch, E.; Jaworek, J.; and Augustyniak, P.** "Design of a wearable sensor network for home monitoring system." in Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. pp. 401–403. ISBN: 978-83-60810-22-4. October 2011.
13. **Channappa Bhyri; Kalpana.V; S.T. Hamde; and L.M. Waghmare.** "Estimation of ECG features using LabVIEW." TECHNIA – International Journal of Computing Science and Communication Technologies. Vol. 2. No. 1. ISSN: 0974-3375. July 2009.
14. **The CSE Working Party.** "Recommendations for Measurement Standards in Quantitative Electrocardiography." European Heart Journal. Vol. 6. pp. 815-825 © European Society of Cardiology. 1985.
15. **Task Force of the European Society of Cardiology and North American Society of Pacing and electrophysiology.** Heart Rate Variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. European Heart Journal. 17:354-381. 1996.
16. **Łęskia, J.; and N. Henzel.** "ECG baseline wander and powerline interference reduction using nonlinear filter bank." Signal Processing. Vol. 85. pp. 781-793. 2005.
17. **Seema Nayak; Dr. M. K. Soni; and Dr. Dipali Bansal.** "Filtering Techniques for ECG Signal Processing." International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences. Vol. 2. Issue 2. pp. 671-679. ISSN: 2249-3905. February 2012.
18. **Himanshu S., Kumar; J. S. J. Ashok, V.; and Juliet, A. V.** "Advanced ECG Signal Processing using Virtual Instrument." International Journal of Recent Trends in Engineering and Technology. Vol. 3. No. 2. 2010.
19. **Shuran Quin; Zhong Ji; and Hongjun Zhu.** "The ECG recording and analysis instrumentation based on virtual instrument technology and continuous wavelet transform." Proceedings of 25th Annual International Conference of the IEEE EBMS. pp. 3176-3179.
20. **Merri M; Farden DC; Mottley JG; and Titlebaum EL.** "Sampling frequency of the electrocardiogram for the spectral analysis of heart rate variability." IEEE Trans Biomed Eng. Vol. 37. pp. 99-106. 1990.
21. **A.Voss; N.Wessel; and A.Sanderycol.** "Influence of low sampling rate on heart rate variability analysis based on non linear dynamic." Computers in Cardiology. pp. 689-692. 1995.
22. **L. Heijzel; and E. Roth.** "What is the adequate sampling interval of the ECG signal for heart rate variability analysis in the time domain?" Physiol Meas. Vol. 25. No. 6. pp. 1405-1411. December 2004.
23. **D. Singh, K. Vinod; and S. C. Saxena.** "Sampling frequency of the RR interval time series for spectral analysis of heart rate variability." J. Med. Eng Technol. Vol. 28. No. 6. pp. 263-272. November 2004.
24. **Testing and reporting performance results of cardiac rhythm and ST-segment measuring algorithms.** Arlington, VA, USA. Published as American National Standard ANSI/AAMI EC57:1988.
25. **A. Schuck Jr; and J.O. Wisback.** "QRS Detector pre-processing using the complex wavelet transforms." Proceedings of 25th Annual International Conference of IEEE. pp. 2590-2593. 2003.
26. **Badiezadegan, Shirin; and Soltanian-Zadeh, Hamid.** "Design and Evaluation of Matched Wavelets with Maximum Coding Gain and Minimum Approximation Error Criteria for R Peak Detection in ECG." International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing Vol. 6. No. 6. pp. 799–825. 2008.
27. **M. Faezipour; T. M. Tiwari; A. Saeed; M. Nourani; and L. S. Tamil.** "Wavelet-Based Denoising and Beat Detection of ECG Signal." Proceedings of IEEE on Life Science Systems and Applications Workshop (LiSSA) pp.100-103 April 2009.
28. **Abed A. Raoof Bsoul; Soo-Yeon Ji; Kevin Ward; and Kayvan Najarian.** "Detection of P, QRS, and T Components of ECG Using Wavelet Transformation." Proceedings of the International Conference on Complex Medical Engineering (ICME) pp. 1-6. 2009.
29. **Channappa Bhyri1; S.T. Hamde; and L.M. Waghmare.** "ECG feature extraction and disease diagnosis." Journal of Medical Engineering & Technology. Vol. 35 (6-7). pp. 354–361. 2011.

AUTORES

Ing. Roberto Andrés Bistel Esquivel — Graduado de Ingeniero Biomédico en 2012 (ISPJAE). Se desempeña como Docente – Investigador en el Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME), del Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría” (ISPJAE). La Habana, Cuba. Ha impartido las asignaturas de Electrónica Analógica I y Electrónica Analógica II en las carreras de Ingeniería en Automática e Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica. Sus áreas de interés son la Instrumentación Electrónica y Procesamiento Digital de Señales Biomédicas, así como el análisis de las mismas mediante Instrumentación Virtual.

E-mail: bistel@electrica.cujae.edu.cu

Ing. Ariel Fajardo Márquez – Graduado de Ingeniero en Automática en 2010 (ISPJAE). Se desempeña como Docente – Investigador en el Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME). Ha impartido las asignaturas de Circuitos Eléctricos III, Electrónica Analógica I, Electrónica Analógica II y Electrónica Analógica III en las carreras de Ingeniería en Automática e Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica. Actualmente es estudiante de Postgrado en la Maestría en Diseño de Sistemas Electrónicos del CIME.

E-mail: ariel.fm@electrica.cujae.edu.cu

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS PARA LA ENSEÑANZA DEL MOVIMIENTO RECTILÍNEO EN EL LABORATORIO

DESIGN, CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF ACQUISITION SYSTEM AND ANALYSIS OF DATA FOR THE TEACHING OF THE UNIDIMENSIONAL MOVEMENT IN THE LABORATORY

Yeimmy Londoño¹, Jimmy A. Cortes², María E. Fernández³

¹ Docente Tiempo Completo y Docente Catedrático (Robótica Aplicada UTP, Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia y Universidad del Valle, Colombia)

² Docente Tiempo Completo (Robótica Aplicada UTP, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia)

³ Docente Catedrático (Transiciones de Fase en Sistemas no Metálicos Universidad del Valle, Departamento de Ciencias Físicas y Tecnologías, Universidad ICESI, Colombia)

(Recibido: Mayo/2017. Aceptado: Junio/2017)

Resumen

Los equipos y prototipos disponibles en Colombia para la enseñanza de la física a nivel medio y superior, son por norma costosos, imposibles de actualizar y/o adecuar a diferentes necesidades y soportados en otros idiomas diferentes al español entre otras limitantes, razón por la cual se diseña y construye un sistema que cubra las necesidades básicas de un curso de física experimental, que en contraste con los importados sea económico, con hardware y software libre que es fácil de actualizar y/o adecuar a las necesidades puntuales de cualquier curso o profesor. A manera de ejemplo, se comparten los resultados obtenidos con estudiantes de la Universidad del Valle sede Tuluá, en la cual se hizo el experimento llamado “Teorema del trabajo y la energía mecánica”, usando el sistema descrito en este documento.

Palabras clave: Física, Mecánica, Arduino, Fotosensor, Fotocompuerta

Abstract

The equipment and prototypes available in Colombia for the teaching of physics at the intermediate and higher level, are normally expensive, impossible to update and/or adapt to different needs and supported in languages other than Spanish among other limitations. This is why a new system is designed and constructed that covers the basic needs of an experimental physics course, in contrast to the imported one, with hardware and free software easier to update and/or adapt to the specific needs of any course or teacher. As example, we show the results obtained with students of the Universidad del Valle (Tuluá), in the experiment called “Mechanical Work Theorem” which was carried out, using the system described in this document.

Keywords: Physics, Mechanics, Arduino, Photosensor, Photogate

Método e identificación del problema

instrumentos de medición de tiempo, masa, velocidad, peso, color, temperatura y demás variables que son de importancia para determinar las tendencias de los fenómenos físicos estudiados. Los altos costos de los equipos de laboratorio crean la necesidad de diseñar y construir un equipo especial para tomar la variable más utilizada de todas, el tiempo.

Durante la etapa de diseño y pensando en posibles usuarios futuros, surge la necesidad de implementar un Hardware y Software de libre acceso (Open Source), que tenga un buen nivel de reproducibilidad, evitando así problemas de altos costos en compra de Hardware y Software. Gracias a las licencias libres es posible diseñar y fabricar diferentes y significativos laboratorios y sistemas basados en el sistema Arduino Nano, que fue el seleccionado para la puesta en marcha de este prototipo.

Necesidad de la experimentación en los cursos de física

En el mundo actual y a lo largo de la historia de las ciencias, desde René Descartes (1596) e Isaac Newton (1643) a Carl Sagan (1934) y Peter Higgs (1929), pasando por todos los estudiantes y personas dedicadas o relacionadas con las ciencias naturales e ingenierías, existe la necesidad y obligación de hacer mediciones directas e indirectas de todo tipo de magnitud física, como requisito y paso fundamental impuesto por el método científico. Es por esta razón que medir el tiempo adquiere una importancia especial, ya que esta es la variable independiente por excelencia que rige a todos y a todo.

Esto permite conocer cómo evoluciona un fenómeno en función del tiempo, y así poder determinar múltiples magnitudes cinemáticas físicas del mismo, como pueden ser: Velocidad instantánea (aproximada), velocidad media, aceleración, períodos y/o frecuencias de oscilación de péndulos, contar oscilaciones entre otras.

Criterios y aspectos tenidos en cuenta para el diseño del sistema

En general los sistemas y métodos de adquisición de datos (en este caso tiempos), con los que se dispone en Colombia, son de muy buena calidad, precisión y exactitud, sin embargo, en su mayoría son desarrollados en países donde el aspecto económico no es una limitante, es decir que los usuarios de los países desarrolladores no tienen dificultades en contar con tal o cual sensor según sean sus propias necesidades; en contraste en Colombia adquirir cualquier tipo de sensor es normalmente costoso, más aún si cada día dependemos de la cotización del precio del dólar, lo cual impide que instituciones educativas de tamaño mediano y pequeño tengan la posibilidad de contar con equipos idóneos (incluso con ninguno) para la enseñanza de la física.

Otra limitante para las instituciones colombianas, son las barreras del lenguaje, ya que la literatura, contactos, soporte etc., para conocer detalles sobre estos equipos se encuentran en su mayoría en lenguajes diferentes al español, esto hace que el espectro de

posibilidades para hacer una adecuada adquisición se vea también afectada.

El aspecto técnico también es fundamental, ya que los sistemas disponibles en el mercado colombiano son de licencia cerrada, lo cual nos impide hacer cualquier modificación en el hardware o software para ajustarlo a nuestras propias necesidades, haciendo esto que muchas veces estos tipos de equipos sean subutilizados.

El ambiente académico actual demanda nuevas formas de satisfacer en los estudiantes el deseo por adquirir y/o desarrollar el conocimiento, aumentar la capacidad de análisis de situaciones, la búsqueda de soluciones, el incremento de pensamiento crítico, los aspectos anteriores se han tenido muy en cuenta para el desarrollo e implementación del prototipo desarrollado y puesto a prueba.

Fundamentos pedagógicos que justifican la necesidad de la práctica/experimentación en los procesos de enseñanza aprendizaje

El prototipo desarrollado en este trabajo será herramienta fundamental en el proceso de enseñanza aprendizaje en cursos de física mecánica de colegios y universidades de Colombia, razón por la cual pedagógicamente se tuvieron que tener presentes conceptos tales como:

- Aprendizaje significativo: El cual según el profesor de la universidad ICESI José H. González afirma que: “La capacidad para definir el área o tema de su interés; de buscar la información en diferentes fuentes, de planificar los espacios de estudio y cumplirlos; de extractar de los materiales las ideas principales y secundarias; de hacer referencia continuamente a sus propias experiencias dentro de la misma área de estudio, y con otras áreas de conocimiento y de experiencia; de atreverse a solucionar problemas ya formulados en los materiales de estudio que ha seleccionado; de atreverse a formular situaciones hipotéticas de utilización de los contenidos que está aprendiendo; de atreverse a encontrar similitudes o diferencias radicales entre el área de

conocimiento (o el tema) que está estudiando y otras áreas del conocimiento; y finalmente, de evaluar los resultados del proceso de aprendizaje...”.[1]

- Inteligencias múltiples: Donde el investigador de la universidad de Harvard Howard Gardner (1979), definió la inteligencia como: “la capacidad de resolver problemas o de crear productos que sean valiosos en uno o más ambientes culturales”. Lo sustantivo de su teoría consiste en reconocer la existencia de ocho inteligencias diferentes e independientes, que pueden interactuar y potenciarse recíprocamente. La existencia de una de ellas, sin embargo, no es predictiva de la existencia de alguna de las otras.[2]
- Aprendizaje basado en Resolución de Problemas (ABP): Según el cual un problema es “una tarea que plantea al individuo la necesidad de resolverla y ante la cual no tiene un procedimiento fácilmente accesible para hallar la solución” (Lester, 1983). Así, se debe distinguir entre un problema y un ejercicio de aplicación. Para solucionar un problema se requiere más que saber cómo realizar cálculos o aplicar procedimientos.[3]

Fundamentos Básicos del Hardware utilizado

El corazón del hardware escogido para desarrollar este prototipo fue el módulo Arduino Nano, debido a su fácil disponibilidad, bajo costo y por ser un Hardware de licencia abierta.

El módulo Arduino Nano es una pequeña y completa placa basada en un procesador ATmega328 (Figura 1). Tiene más o menos la misma funcionalidad de la Arduino Duemilanove y Arduino UNO, pero en un paquete diferente. Carece de toma de corriente continua, en cambio se comunica y alimenta con un cable USB Mini-B. El Arduino Nano fue diseñado y es producido por Gravitech.[4]

Proceso de construcción

En el proceso de diseño (Figura 2) del sistema se tuvieron en cuenta que todos los elementos usados fueran de fácil adquisición

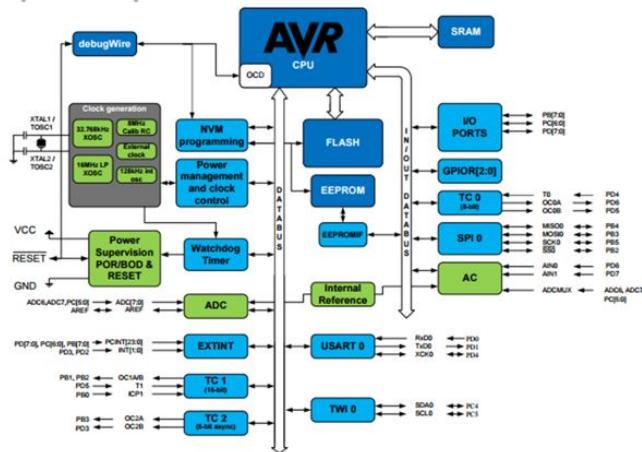


FIGURA 1. Diagrama de bloques del procesador ATmega328.

en el mercado local; que no fueran de tamaño demasiado reducido, de tal forma que cualquier usuario lo pueda reparar y/o modificar; se dispusieron los elementos en la placa de tal forma que se pueda hacer seguimiento a los procesos en el prototipo.

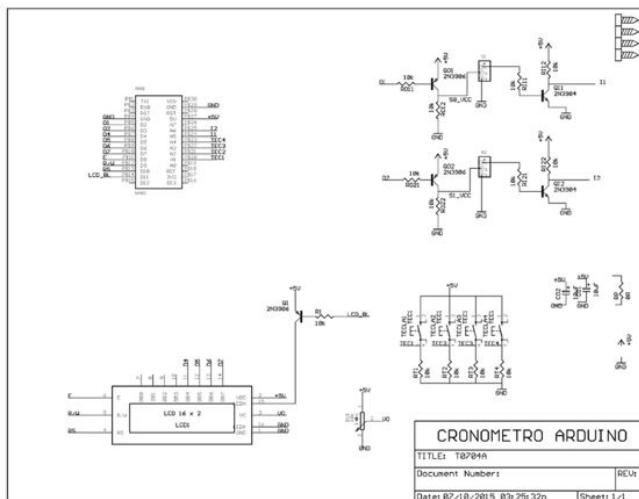


FIGURA 2. Plano del sistema con sus elementos.

El diseño, simulaciones y esquemas (Figura 3) se hicieron con el software Eagle versión 5.

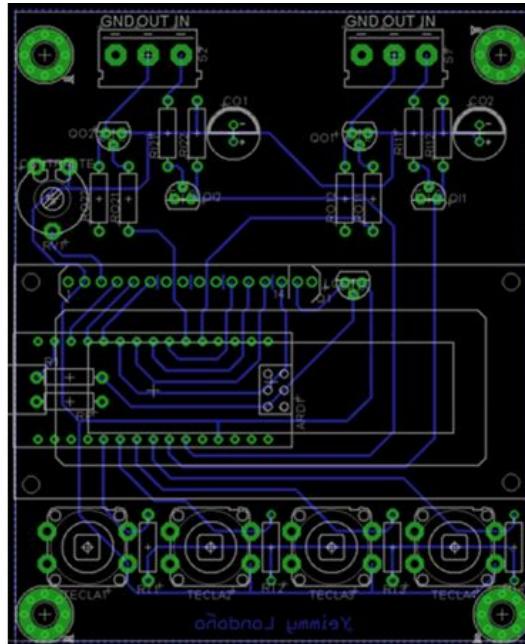


FIGURA 3. Esquema de la placa (Eagle Versión 5)

Los costos de los elementos usados para el ensamblado del sistema, son los de una tienda de electrónica común del mercado local, los materiales, cantidades y costos aparecen listados en la Tabla 1.

Nombre del elemento	Cantidad	Valor (COP)
Base de dos filas para Arduino Nano de 30 pines	1	\$1000
Base de una fila para display de 16 pines	1	\$1000
Botón normalmente abierto para teclas	4	\$4800
Cables, acrílico		\$3000
Capacitor 10 μ F a 16V	2	\$500
Display 16 x 26	1	\$10000
Fotocompuerta OPTEK 9212	1	\$9000
Hembra de montaje PCB de tres líneas	2	\$1600
Módulo Arduino NANO	1	\$40000
Placa base	1	\$80000
Resistores de 1/4W de 10k Ω	12	\$1200
Tornillos, tuercas de 1/8"	4	\$2000
Transistor 2N3904	2	\$600
Transistor 2N3906	2	\$600
Trimmer superficial 4K7	1	\$1200
TOTAL		\$155000

TABLA 1. Materiales, cantidades y costos del sistema.

Fundamentos básicos del software utilizado

En el proceso de ensamblado y configuración del sistema, fue necesario instalar el programa desarrollado en el módulo Arduino, el cual se encarga de interpretar los datos de tiempo obtenidos por el fotosensor e interpretarlos y mostrarlos como velocidad o aceleración según sea la necesidad del usuario, ya sea en el propio display del sistema o en la pantalla de un computador. De manera complementaria se creó una interface gráfica de usuario GUI que puede mostrar en la pantalla de un computador, los resultados mostrados en el display del prototipo acompañada de sus gráficos correspondientes. Los lenguajes de programación utilizados para desarrollar estos programas fueron:

- Arduino: El ATmega328 del Arduino Nano vienen precargado con un cargador de arranque que le permite cargar nuevo código a ella sin el uso de un programador de hardware externo. Se comunica usando el protocolo original STK500. Se puede pasar por alto el gestor de arranque y programar el microcontrolador a través de la (programación serial en circuito) ICSP encabezado utilizando Arduino ISP o similar. Para programar o editar el programa de la placa Arduino que controla el Timer-Arduino, es necesario instalar su propio lenguaje o sketch de la página www.arduino.cc del proveedor. Este software es de licencia libre.

- Processing: El sistema en uno de sus modos de funcionamiento, puede transmitir los datos y resultados obtenidos a un computador a través de puerto serial, se creó un programa que muestra los resultados y gráficos en la pantalla del computador, esta consola o GUI se hizo en el lenguaje de programación Processing. Este lenguaje de programación se puede descargar directamente del WebSite del proveedor en <https://processing.org/download/?processing>. Este software es de licencia libre.

Descripción general del sistema

Los botones de interacción del prototipo con el usuario se muestran en la Figura 4.

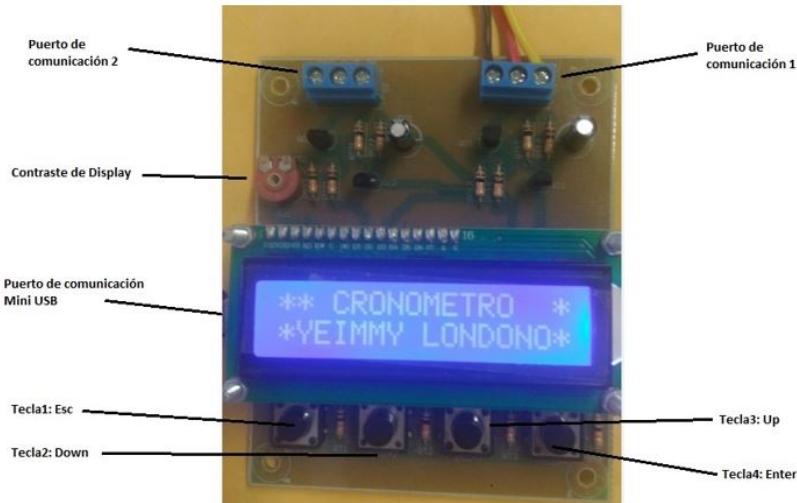


FIGURA 4. Descripción del prototipo.

- Puertos de comunicación (1 y 2): Permiten la conectividad del sistema con el medio exterior a través de diferentes tipos de sensores según este programado el sistema, en el trabajo presente está programado para que el sensor a usar sea una fotocompuerta comercial conectada al puerto de comunicaciones 1 que mide tiempos de sombra entre la misma. El puerto de comunicaciones 2 está disponible para futuras aplicaciones y puede implementarse por software según la necesidad.
- Puerto de comunicación Mini USB: Puerto de comunicación del propio Arduino Nano que permite la transferencia de datos desde y hacia el sistema. A través de este mismo puerto el sistema se alimenta, ya sea a través del computador o una fuente/cargador estándar de celular. Contraste del display: Permite ajustar la luz de fondo del display según las necesidades del usuario, para que se pueda tener una lectura cómoda de los mensajes mostrados en el display.

- Tecla1 (Escape): Retrocede uno a uno entre los diferentes menú hasta llegar (si es necesario) al inicial “TOTAL FRANJAS: ...”.
- Tecla2 (Down): Cambia entre las opciones del menú escogido hacia abajo, por ejemplo; si se está en el menú “TOTAL FRANJAS...”, su valor decrecerá de uno en uno hasta llegar al mínimo que es 1.
- Tecla3 (Up): Cambia entre las opciones del menú escogido hacia arriba, por ejemplo; si se está en el menú “TOTAL FRANJAS...”, su valor aumentará de uno en uno hasta llegar al máximo que es 10.
- Tecla4 (Enter): Acepta la opción seleccionada en el menú que se encuentre activo.

Determinación de la incertidumbre en las medidas del tiempo del TIMER

Se debió de montar un sistema tal que un TIMER patrón tomara medidas de tiempo de forma simultánea y bajo las mismas condiciones que el TIMER prototipo, para esto se siguieron los siguientes pasos:

1. Se escogió el TIMER PASCO ME-9215A del laboratorio de física mecánica de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Cali, el cual es un equipo que se encuentra calibrado y de la cual se conoce su ficha técnica, se usó este equipo como TIMER patrón para determinar un estimado de la incertidumbre del prototipo construido.
2. Se adosaron las Fotocompuertas del Timer PASCO y el Timer prototipo, asegurando que las alturas de los de los diodos emisores y fotoreceptores fueran las mismas, para lograr que la franja de la cual se cronometró el tiempo de paso, activaran de forma simultanea los dos Timer.
3. Se implementó un electroimán a una altura fija en un soporte universal, que sostuviera por electromagnetismo un clip que a su vez sostenía la reja de franjas oscuras, esto con el fin de

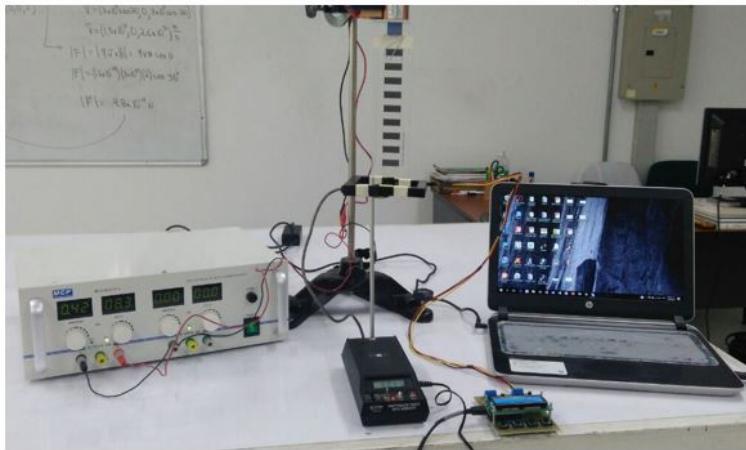


FIGURA 5. Disposición de los elementos para determinar la incertidumbre del sistema.

lograr que la reja se pudiera soltar siempre con las mismas condiciones al interrumpir el flujo de corriente a través de la fuente DC.

4. Se dispusieron todos los elementos (Figura 5) de tal forma que cada vez que se interrumpía el flujo de corriente en el electroimán, la reja caía libremente a través de las dos Fotocompuertas, ambos Timer se colocaron en modo GATE, en el cual los sistemas cronometran el tiempo de sombra a través de ellas, únicamente de la primera franja que detectan; el ancho de la franja utilizada fue de 10mm.
5. Se procedió a tomar 30 datos de tiempo de sombra en las mismas condiciones con ambos sistemas y hacer el análisis estadístico de los mismos.
6. Se tuvo en cuenta para la toma de los datos que ambos Timer presentaban un error de apreciación en los display de 1ms. Los resultados intermedios y la incertidumbre se muestran con tres decimales ($\Delta t = 1,340\text{ms}$), sin embargo, hay que tener en cuenta que el redondeo debe llevarse hasta la unidad. Otro criterio a tener en cuenta en instrumentación, es que se debe redondear por encima para asegurar que todos los valores futuros de tiempo, a medir, estén contenidos dentro

del intervalo de confianza, es decir que en conclusión la incertidumbre en las medidas de tiempo del Timer prototipo es:

$$\Delta t = 2ms$$

Descripción del sistema como instrumento independiente

El sistema se encuentra en Modo Independiente cuando no está conectado a un computador (Figura 6) para ser operativo. En este modo sólo requiere de conexión a la fuente de poder y está listo para hacer toma de datos, en futuras versiones se ha considerado que el sistema pueda funcionar mediante el uso de batería recargable semejante a un teléfono celular.

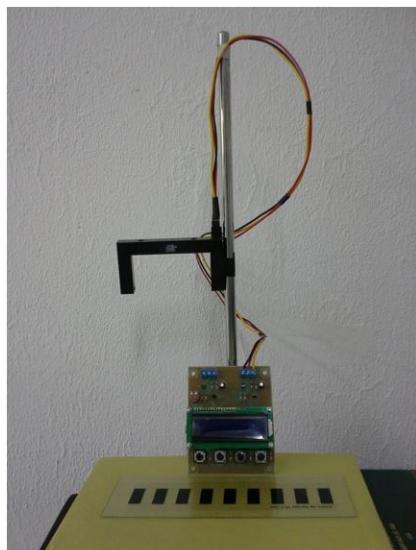


FIGURA 6. Sistema modo independiente (prototipo, fotocompuerta, rejilla de 9 franjas).

En este modo de operación los resultados se muestran directamente en el display, los cuales son: Velocidad media (m/s), Tiempo total (s) y/o Aceleración (m/s^2).

Sistema acoplado a un computador

El sistema está en modo acoplado a un computador (Figura 7) cuando este envía los datos que aparecen en el display al computador a través de conexión serial usando el puerto estándar USB de los computadores, gracias al software (GUI) interpreta gráficamente los datos y resultados, los cuales muestran en la pantalla del computador las tendencias del MRU y del MRUA.

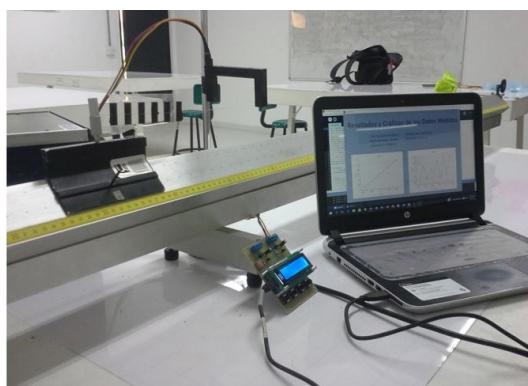


FIGURA 7. Sistema acoplado a un computador.

Ensayo del prototipo y resultados arrojados

El sistema se ha probado haciendo prácticas de laboratorio en ambientes académicos reales (Universidad del Valle sede Tuluá), en temas como Cinemática (Movimiento rectilíneo uniforme y Caída libre), y Trabajo y energía (Teorema del trabajo y la energía).

A continuación se muestra a manera de ejemplo los apartes de la guía de laboratorio usado para el experimento de Teorema del trabajo y la energía y los resultados obtenidos por uno de los grupos de trabajo:

Ejemplo - Teorema del trabajo y la energía

- Verificar experimentalmente el teorema del trabajo y la energía

- Calcular el trabajo mecánico realizado por una fuerza constante F .
- Obtener experimentalmente la energía cinética de un móvil.

Los datos medidos (teóricos) de la masa M del carro planeador, la masa suspendida m y la aceleración de la gravedad son respectivamente:

Masa del carro planeador $M = (0.19021 \pm 0.00001)$ Kg

Masa suspendida $m = (0.00387 \pm 0.00001)$ Kg

Aceleración de la gravedad $g = 9,810 \text{ m/s}^2$

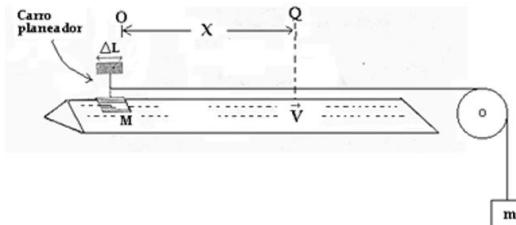


FIGURA 8. Montaje del sistema para Trabajo y Energía.

Se montaron los equipos como se muestra en la Figura 8, se tomaron los datos y se registraron en la Tabla 2, luego se calcularon las columnas de trabajo W y velocidad al cuadrado V^2 . La columna del trabajo para esta situación se calcula multiplicando cada distancia de recorrido del carro X por la fuerza constante mg , ya que se considera que las otras fuerzas que actúan sobre el sistema no aportan al trabajo neto, puesto que el peso y la normal del carro son perpendiculares al desplazamiento y que la fuerza de fricción debida al carril de aire es despreciable.[5]

Cálculos y resultados

1. Realice un gráfico del trabajo W vs V^2 (Figura 9) y con base en este gráfico calcule el valor de la masa del carro planeador M . ¿Qué se puede decir de la relación entre variables en este gráfico?

Posición de la fotocompuerta x(m)		Velocidad Timer-Arduino v(m/s)			Velocidad promedio v(m/s)	Trabajo mecánico W(J)	Velocidad promedio al cuadrado v ² (m ² /s ²)
$\Delta x=0,001$ m		$\Delta v=0,001$ m/s				$\Delta W=0,001$ J	$\Delta v^2=0,001$ (m ² /s ²)
	x(m)	v ₁ (m/s)	v ₂ (m/s)	v ₃ (m/s)	$\langle v \rangle$ (m/s)	W(J)	v ² (m ² /s ²)
x ₁	0,100	0,196	0,204	0,204	0,201	0,004	0,041
x ₂	0,200	0,282	0,275	0,275	0,277	0,008	0,077
x ₃	0,300	0,344	0,344	0,345	0,344	0,011	0,119
x ₄	0,400	0,407	0,407	0,407	0,407	0,015	0,166
x ₅	0,500	0,458	0,478	0,478	0,471	0,019	0,222
x ₆	0,600	0,500	0,524	0,500	0,508	0,023	0,258
x ₇	0,700	0,550	0,524	0,524	0,533	0,027	0,284
x ₈	0,800	0,579	0,579	0,611	0,590	0,030	0,348
x ₉	0,900	0,611	0,579	0,579	0,590	0,034	0,348
x ₁₀	1,000	0,647	0,647	0,611	0,635	0,038	0,403

TABLA 2. Datos experimentales obtenidos por estudiantes para el experimento de “Teorema del trabajo y la energía”.

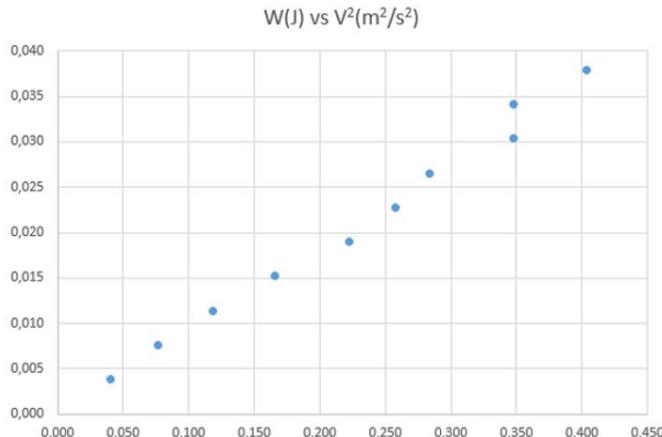


FIGURA 9. Gráfico de W vs V^2 .

2. Compare el valor de la masa del carro M obtenida del numeral anterior con la masa real del carro M_{real} (medida directamente mediante una balanza).

Según la ecuación $W = \frac{MV_f^2}{2}$, la dependencia entre el trabajo (W) y la velocidad al cuadrado (V^2) es de tipo lineal (Figura 8) con pendiente igual a la mitad de la masa del carro

planeador y corte en el origen. Se procedió entonces a hacer el ajuste de tipo lineal con la ayuda de Excel, la ecuación ajustada es:

$$y = 0.0926x - 9 \times 10^{-5}$$

El valor del corte de esta recta con el eje del trabajo W debe de valer cero (0) en teoría, sin embargo, experimentalmente está dando un número del orden de 10^{-5} , el cual puede considerarse despreciable.

Además, se puede interpretar que la masa del carro planeador M es el doble de la pendiente que en unidades del SI es: $\langle M \rangle = 0.18525\text{Kg}$. Usando la ecuación $\delta m = \frac{\sqrt{N}\sigma}{\sqrt{(N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)}}$ se obtiene el error absoluto $\delta m = \Delta M = 0.00328\text{Kg}$. A partir de los propios datos experimentales obtenidos se puede reportar completamente el valor experimental de la masa del carro planeador junto a su error asociado como:

$$M = (0.18525 \pm 0.00328)\text{Kg} \quad E \% = 1.8 \%$$

Recomendaciones, sugerencias y conclusiones

- El sistema diseñado y probado cuenta con dos puertos de entrada que pueden tomar dos tipos diferentes de mediciones desde dos equipos o sensores y ampliar de esta forma el rango de aplicaciones o prácticas de laboratorio que se pueden llevar a cabo.
- El código de programación tanto del Arduino como de la GUI pueden editarse para lograr mejoras en sus líneas de código, mejorar la interfaz, cambiar o editar la forma de presentar la información y presentar otros tipos de resultados, según la necesidad y creatividad del usuario.
- Se construyó un sistema que de forma autónoma y/o conectado a un computador, mide tiempos, velocidades medias, velocidades instantáneas y aceleraciones medias para el desarrollo de prácticas de laboratorio en colegios y universidades colombianas que no cuentan con los recursos económicos suficientes que les impide comprar equipos muy costosos del exterior.

- Se documentó todo el proceso de diseño, construcción e implementación del prototipo, de tal forma que cualquier profesor o institución interesado pueda reproducirlo y/o complementarlo.
- Se puso a prueba el sistema en un ambiente académico real, obteniendo resultados con errores menores al 5 % respecto de los valores teóricos esperados.

Referencias

- [1] H. González, *El Proyecto Educativo De La Universidad ICESI y El Aprendizaje Activo* (Cali: Universidad ICESI, 2000).
- [2] F. Pérez and I. Truffello, Revista Enfoques Educacionales 1 (1998).
- [3] “Ministerio de educación nacional. lineamientos curriculares en matemáticas.” (1998).
- [4] “Arduino Nano V3 - ATmega328 5v + Cable USB Compatible,” (2017-02-27), <https://electronilab.co/tienda/arduino-nano-v3-atmega328-5v-cable-usb/>.
- [5] P. Tipler and G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*, Física para la ciencia y la tecnología No. v. 1 (Reverté, 2005).



Ingeniería Energética

E-ISSN: 1815-5901

orestes@cipel.ispjae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio

Echeverría

Cuba

Arce, Dennis; Fernández, Sergio J.; Fuentes, Omar
Aplicación de las técnicas de hardware reconfigurable en un sistema digital de control dinámico.
Fundamento teórico-práctico. Parte I
Ingeniería Energética, vol. XXIX, núm. 2, 2008, pp. 3-7
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127758001>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Aplicación de las técnicas de hardware reconfigurable en un sistema digital de control dinámico. Fundamento teórico-práctico. Parte I

Dennis Arce
Sergio J. Fernández
Omar Fuentes

Recibido: Enero del 2008
Aprobado: Marzo del 2008

Resumen / Abstract

El presente trabajo está dividido en dos partes; en la primera se presenta el fundamento teórico de nuevas técnicas de diseño electrónico para el desarrollo de un sistema de control dinámico de un servomotor, lo cual es una novedad técnica en el campo de la rama energética. Aquí se expone el estudio del importamiento de este sistema de control y la utilidad de las técnicas de hardware programable como herramienta en el diseño y desarrollo del mismo.

Palabras clave: FPGA, control, hardware programable, sistema de control dinámico

This paper is divided in two parts, the first one presents the theoretical foundation of new electronic design techniques for the development of dynamic control system for servomotor, that which is a technical novelty on the field of energetic branch. Also describes the behavior of this control system and utility of the techniques of programmable hardware as tool in the design and development of the same one.

Key words: FPGA, control, programmable hardware, dynamic control system

INTRODUCCIÓN

El uso y desarrollo de esta nueva tecnología aplicada en el diseño de un sistema digital de control para un servomotor, significa un avance en el crecimiento de la cultura tecnológica nacional al introducir nuevos elementos de hardware en el campo de aplicaciones de la rama energética, lo cual permite el desarrollo de grupos de investigación a lo largo de todo el país en este campo de la ciencia, impulsando la exploración y explotación de esta tecnología con beneficios tanto sociales como económicos.

Durante los últimos treinta años ha surgido la idea de la aplicación múltiple del hardware a partir del desarrollo

de un circuito digital, que fuera capaz de ser programado a partir de softwares específicos permitiendo una reconfiguración total. Los mismos han tenido un rápido desarrollo en los últimos años dando lugar a la aparición de circuitos de desarrollo a partir de técnicas implementadas por compañías como Xilinx y Altera, productoras de FPGAs (Field Programmable Gate Array), los cuales representan un vuelco parcial o total en el diseño y construcción del hardware hasta ahora implementado.¹

La utilidad de estos dispositivos está fuertemente relacionada con los sistemas de monitoreo de medición y control de las máquinas eléctricas, herramientas y

dispositivos automáticos y semiautomáticos del presente, en busca de un mejor funcionamiento, durabilidad y fiabilidad. Por lo tanto, en cada diseño digital involucrado en esta rama puede incluirse uno de estos hardwares programables, compactando en gran medida el dispositivo en cuestión.

En el presente, las aplicaciones industriales requieren la habilidad de comunicarse con ciertos hardwares comunes y softwares de manejo de información. Las nuevas tecnologías demandan altas capacidades de procesamiento digital de señales y conectividad, para las aplicaciones industriales de hoy. El control y seguimiento de dispositivos en la actualidad requiere un monitoreo en tiempo real tanto en la esfera industrial, militar, turística, etc., lo cual hace que este tipo de tecnología sea ideal.

En este trabajo se tratarán los elementos básicos que permiten el diseño de un sistema de control dinámico de servomotores a partir de la utilización de una FPGA.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de diseño utilizando hardware programable es similar a la de cualquier sistema digital, salvo que al final se obtiene un fichero ejecutable que se puede enviar a la FPGA para que se reconfigure, implementando así el diseño.

En cualquier tipo de diseño debe existir una etapa inicial en la cual hay que tener en cuenta la descripción del circuito que se va a realizar, luego se pasa a su simulación y finalmente a su desarrollo práctico. Este proceso, con los métodos convencionales puede llevar varios ciclos con la demora de fabricación y costo de componentes. Sin embargo, en el caso del diseño con las FPGAs, estos últimos pasos pueden ser abreviados a partir de la utilización de un lenguaje de descripción de hardware como VHDL a partir del cual se pueden realizar simulaciones para comprobar que lo diseñado es correcto, a partir de lo cual se instrumenta directamente el circuito.²

A partir de las especificaciones y utilizando un software compilador, se obtiene un fichero llamado bitstream que contiene toda la información necesaria para configurar la FPGA. Hecho esto, estará listo el hardware situado en el interior de un chip. No es necesario soldar, ni comprar componentes, ni emplear tiempo haciendo un prototipo. El proceso de diseño se realiza directamente en un hardware ya ubicado, agilizando el proceso y disminuyendo además el costo del mismo. De esta forma los cambios en el diseño se pueden hacer tan rápidos como en el caso de un software diseñado.

Durante el diseño se deben pasar por varias etapas de simulación. Inicialmente la descripción RTL o en HDL, es realizada mediante la creación de bancos de prueba para simular el sistema y observar los resultados. Entonces, después de la síntesis, se mapea el diseño a una lista-red (netlist), luego esta es traducida a un nivel descrito por compuertas lógicas, donde la simulación se repite para confirmar que el proceso de síntesis no tenga errores. Finalmente, el diseño es introducido en la FPGA y se vuelve a simular la corrida. Todo este proceso es prácticamente automático y controlado por el software especializado.³

UTILIDAD DE LAS FPGAS EN EL CAMPO DE LA ENERGÉTICA

Su utilidad está fuertemente relacionada con los sistemas de monitoreo de medición y control de las máquinas eléctricas, herramientas y dispositivos automáticos y semiautomáticos del presente, en busca de un mejor funcionamiento, durabilidad y fiabilidad. Por lo tanto, en cada diseño digital involucrado en esta rama puede incluirse uno de estos hardwares programables, compactando en gran medida el dispositivo tratado.

En el presente, las aplicaciones industriales requieren la habilidad de comunicarse con ciertos hardwares comunes y softwares de manejo de información. Las nuevas tecnologías requieren de altas capacidades de procesamiento digital de señales y conectividad, para las aplicaciones industriales de hoy. El control y seguimiento de dispositivos en la actualidad demanda un monitoreo en tiempo real tanto en la esfera industrial, militar, turística, etc., lo cual hace que este tipo de tecnología sea ideal.

UTILIDAD DE LAS FPGAS EN OTRAS APLICACIONES

Las FPGAs son usadas en muchas aplicaciones como una alternativa de los DSPs y procesadores de alta configuración. En el presente se desarrollan también dispositivos híbridos basados en FPGAs y procesadores ubicados en la misma placa para optimizar costos y configuración.

Este sistema se puede aplicar en diversas áreas como la docencia, en el campo de la electrónica, permitiendo que los alumnos hagan sus propios diseños, simulen y realicen el montaje en una tarjeta entrenadora provista de una FPGA, pudiendo comprobar físicamente por sí mismos el correcto funcionamiento .

Pueden ser utilizadas en el desarrollo de periféricos para microcontroladores, controladores de sensores, coprocesadores para hacer las operaciones más rápidamente, etc. Además de esto, por su facilidad de

programación, pueden desarrollarse sistemas de hardware reconfigurables en pleno funcionamiento. También en la robótica puede ser muy útil diseñando CPUs específicas para algunas aplicaciones, para temporizadores, etcétera.

En la electrónica automovilística tienen un amplio y creciente rango de aplicación e incluye aplicaciones como los sistemas de navegación, de entretenimiento, grupos instrumentales, sistemas avanzados de manejo de información y dispositivos de comunicaciones.

En el mundo, actualmente, se están usando en telefonía, procesamiento de señales de video, creación de videojuegos, sistemas de procesamiento de datos para satélites, sistemas de redes, entre otros. Cuba no se queda atrás, ya hace más de un año se está trabajando con este tipo de tecnología, aunque no es muy difundida todavía.

Características de los servomotores y servo-controles

Un servomotor es un dispositivo similar a un motor de corriente directa, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radiocontrol y en robótica, pero su uso no está limitado a estos.

El servocontrol es un control con lazo cerrado de posición y velocidad. La palabra servo se deriva de la misma raíz que la palabra sirviente. La salida del lazo de control es una señal de torque (o equivalentemente, corriente), el cual es entregado al circuito del motor. El lazo del servocontrol calcula el torque necesario a través de los datos de posición y/o velocidad.

Características de un sistema analógico de control para un servomotor específico

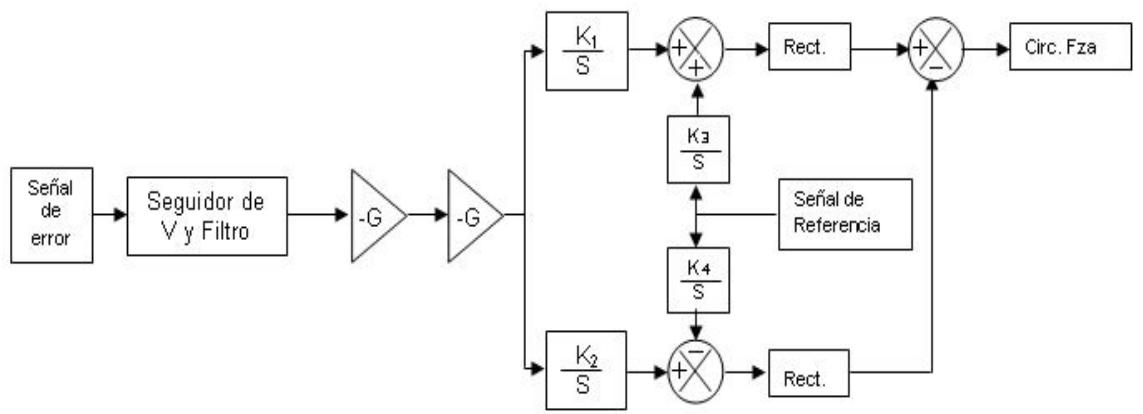
El controlador analógico que se describe en este trabajo consta de cuatro partes fundamentales. La primera es la etapa de filtrado, y se encarga de desechar cualquier componente de la señal que no corresponda con la frecuencia fundamental del sistema. Ver figura 1.

La segunda es la etapa de ganancias, donde la señal filtrada es amplificada en dos pasos, cada uno de ellos compuestos por amplificadores inversores, de ahí la necesidad de utilizar un segundo inversor para conservar la forma de onda de la señal original.

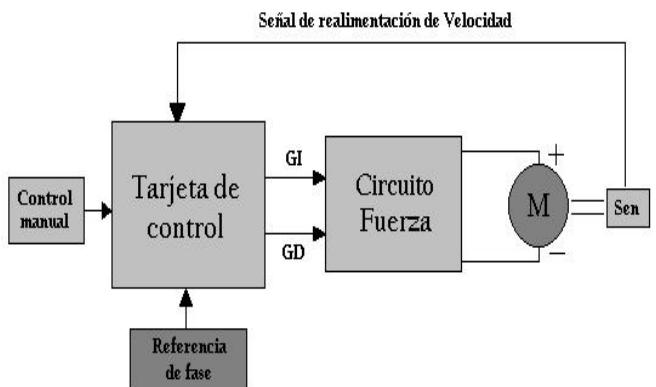
La tercera está formada por dos secciones de suma y rectificación, utilizando para esto un rectificador de precisión diseñado con amplificadores operacionales. La función principal de esta etapa es la detección de desfasaje entre la señal de error y una señal de referencia, indicando el sentido de giro que debe tomar el servomotor.

La cuarta es la de potencia, además de sumarse los voltajes provenientes de cada sección de la tercera parte. El signo del resultado indica el sentido de giro del servomotor. La señal resultante de esta etapa pasa a otro sistema donde se procesa junto a una señal de realimentación para ejecutar el control.

El sistema en conjunto, a partir de tres señales (aunque se incluyan solo dos en el esquema descrito por bloques) efectúa el control de un servomotor relacionando la velocidad con el valor efectivo de la señal de error y el sentido del giro con la fase de la señal. El sistema general se representa en la figura 2.



Estructura en bloques del circuito de control analógico.



Esquema del circuito de control, fuerza y motor.

2

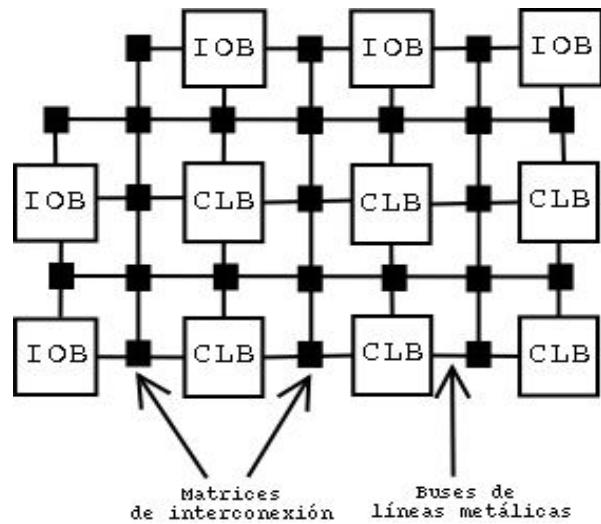
Estructura de las FPGAs

Internamente una FPGA es una serie de pequeños dispositivos lógicos, que algunos fabricantes llaman CLB (Configurable Logic Block), organizados por filas y columnas. Entre los CLB hay un gran número de elementos de interconexión, líneas que pueden unir unos CLB con otros y con otras partes de la FPGA, pueden haber líneas de distintas velocidades. También hay pequeños elementos en cada una de los pines del chip para definir la forma en que esta trabajará (entrada, salida, o ambos), se suelen llamar IOB (Input/Output Block).

Los CLB se unen dinámicamente según cómo se especifique en la memoria de configuración. De esta forma, cambiando el contenido de la esta memoria, se establecen unas uniones diferentes entre los CLBs, obteniéndose un dispositivo u otro. La característica fundamental de las FPGAs es que son dispositivos universales. Se pueden convertir en cualquier diseño digital, según el bitstream que se cargue en su memoria de configuración.²

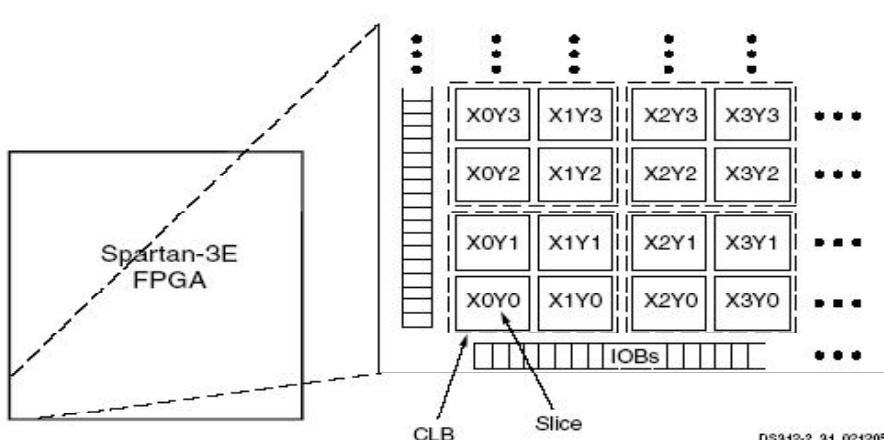
En la figura 3 se muestra la estructura de la FPGA. Los rectángulos negros representan las matrices de interconexión, a las que llegan buses de líneas metálicas. En el interior de estas cajas se configuran las conexiones de las diferentes líneas. Los bloques exteriores son los IOBs y lo interiores los CLBs.

El CLB constituye el principal recurso lógico para implementaciones sincrónicas tales como los circuitos combinados. Cada CLB en un mismo chip es idéntico y contiene cuatro slices, y cada slice contiene dos LUTs (Look-Up Table) para implementar lógica y, dos elementos almacenados que pueden ser usados como flip-flops o latches. Las LUTs pueden ser usadas como memorias de 16x1 (RAM16) o como registros de 16-bits (SRL 16). La mayoría de la lógica de propósito general en un diseño, es automáticamente mapeada en los slices de los CLBs.⁴ Ver figura 4.



Estructura interna de una FPGA.

3



DS342-2_31_021205

Localizaciones de los CLBs en una FPGA de la familia Spartan-3E producida por la compañía Xilinx.

4

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron las características más importantes de las técnicas de hardware programable, así como su funcionalidad y posibilidad de introducción en el control y desarrollo de equipos, dispositivos y sistemas en el campo de la energética y en otras ramas.

A partir de las especificaciones técnicas y mediante la metodología de diseño planteada se procede al diseño, desarrollo e implementación de un sistema digital de control que cumpla con los requerimientos funcionales del circuito analógico, utilizando las técnicas de hardware programable y aprovechando las múltiples ventajas de bajos costos de diseño e implementación sin necesidad de sustitución de componentes, facilidades de reprogramación y rapidez del rediseño; lo cual se expone en la segunda parte de este artículo.

REFERENCIAS

1. Parnell, K. and N. Metha: "Programmable Logic Design Quick Start Handbook", ed. PN 0402230 Rev. 4, 2004: Xilinx, Inc.
2. González, Juan: Convirtiendo el hardware en software: FPGA's, <http://x-ezine.todolinux.com/x2/2x011-fpga.html>, 2006.

3. González, Juan: TARJETA JPS-XPC84: Entrenadora para FPGA, 2004. <http://www.pearobotics.com/personal/juan/doctorado/jps-xpc84/jps-xpc84.html>.

4. Spartan-3E Family, Complete Data Sheet, Xilinx: May 19, 2006.

AUTORES

Dennis Arce López

Ingeniero Electricista, Instructor, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:dennis.al@electrica.cujae.edu.cu

dennisal2004@yahoo.es

Sergio J. Fernández García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:sfg@electrica.cujae.edu.cu

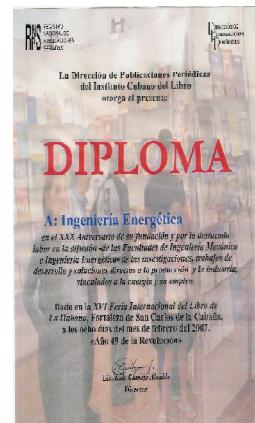
sergiofernandez@yahoo.com

Omar Fuentes Lorenzo

Ingeniero en Automática, Asistente, Universidad de Pinar del Río Hermanos Saiz Montes de Oca, Pinar del Rio, Cuba

e-mail:omarf@tele.upr.edu.cu

*La Dirección
de Publicaciones Periódicas del Instituto Cubano del Libro,
en el marco de la XVI Feria Internacional del Libro, otorgó
a la Revista Ingeniería Energética un diploma por el XXX
Aniversario de su fundación, así como por su destacada
labor en las investigaciones, trabajos de desarrollos y
soluciones directas a la producción y la industria, vincula-
dos a la energía y su empleo.*





Ingeniería Energética

E-ISSN: 1815-5901

orestes@cipel.ispjae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio

Echeverría

Cuba

Arce, Dennis; Fernández, Sergio J.; Fuentes, Omar
Aplicación de las técnicas de hardware reconfigurable en un sistema digital de control dinámico.
Aplicación práctica Parte II
Ingeniería Energética, vol. XXIX, núm. 2, 2008, pp. 8-13
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127758002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Aplicación de las técnicas de hardware reconfigurable en un sistema digital de control dinámico. Aplicación práctica Parte II

Dennis Arce
Sergio J. Fernández
Omar Fuentes

Recibido: Enero del 2008
Aprobado: Marzo del 2008

Resumen / Abstract

Se presenta la aplicación práctica del diseño electrónico en el desarrollo de un sistema de control dinámico de un servomotor lo cual es una novedad científico-técnica en el campo de la energética y en la defensa nacional. En el trabajo se expone la funcionalidad y estructura del hardware programable, así como los resultados parciales de la simulación.

Palabras clave: FPGA, control, hardware programable, sistema de control dinámico

This paper describes the design of a dynamic control system for servomotor making use of new electronic development techniques, and represents a novelty on energetic field and national defence. Also describes structure and functionality of programmable hardware, and partial results of simulation.

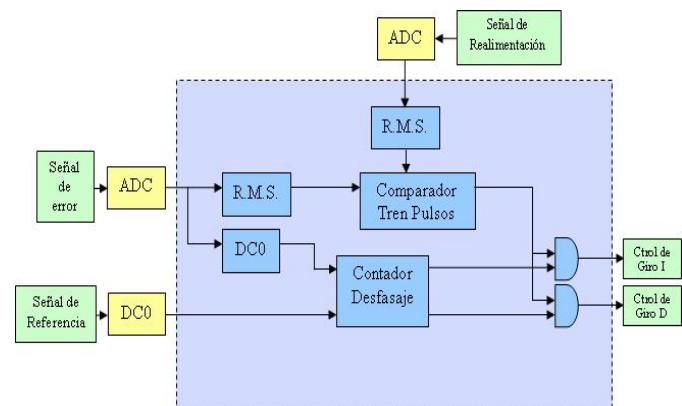
Key words: FPGA, control, programmable hardware, dynamic, control system

INTRODUCCIÓN

Dada la importancia de introducir técnicas modernas utilizando hardwares programables en los diferentes campos de la técnica y en la energética en particular, en esta parte del trabajo se presenta el diseño de un circuito de control dinámico de un servomotor utilizando FPGAs (Field Programmable Gate Array).

REPRESENTACIÓN DEL CIRCUITO DIGITAL DE CONTROL PARA EL SERVOMOTOR UTILIZANDO UNA FPGA

Del estudio del sistema analógico descrito en la primera parte resultó el sistema de control digital, mostrado en una estructura en bloques (figura 1).



Estructura en bloques del sistema digital de control.

Este circuito funcionalmente es similar al circuito analógico descrito, adicionándole un último bloque para el procesamiento de la señal de realimentación.

Para la detección de fase se involucran los bloques DC0 y Contador-Desfasaje, calculando entre los dos el desfasaje que trae la señal de error respecto a la señal de referencia. El DC0 que está implementado dentro de la FPGA da la señal de inicio de conteo y la señal que entra a la FPGA proveniente del detector de cruce externo detiene el conteo, de esta forma se calcula la fase. Luego el dato que se obtiene de estos cálculos se utiliza el bloque de salida que, junto con los datos que se obtienen del bloque de comparación, controla con sus variables de salida el estado de movimiento y el sentido de giro que debe tomar el servomotor.

La comparación que ocurre en el bloque comparador-tren de pulsos se realiza entre la señal de error y la señal de realimentación con el fin de calcular la relación entre la velocidad real del motor con la necesaria para lograr la estabilidad. Al realizar el cálculo comparativo se auxilia de los bloques RMS para trabajar con los valores efectivos de ambas señales. Mientras la primera sea menor, el comparador debe dar en su salida una señal de 1 lógico, indicando que el motor debe estar alimentado y aumentando su velocidad. En el momento en que se igualen las dos señales indica que debe desconectarse el motor para que no sobrepase la velocidad requerida, dando un 0 lógico como salida.

Estas son las principales funciones del controlador, el control de velocidad y el control del sentido de giro. Para el desarrollo de este circuito es ideal la FPGA por sus características ya descritas. Cada bloque trabaja por su cuenta a la misma vez que los demás, solo que aquí intercambian información entre todos para lograr el funcionamiento que se persigue en el diseño del control dinámico.¹

En la tabla 1 se presenta la cantidad y el porcentaje de los elementos internos que se utilizaron en cada caso.

RESULTADOS PARCIALES DE LA SIMULACIÓN

La simulación de un sistema es el primer paso de verificación del correcto funcionamiento del diseño.

El siguiente paso consiste en poner en funcionamiento el prototipo en una placa real para realizar las pruebas físicas de medición y funcionalidad, solo que para poder llegar a esta etapa es necesario un equipamiento especializado, que para el caso de esta investigación debería estar formado como mínimo por tres generadores de onda sinusoidales y dos osciloscopios.

Por último, se realiza el montaje del prototipo en el área de trabajo concreto para la última verificación de funcionalidad.²

Simulación del bloque RMS

En la figura 2 se muestran los datos de entrada y los de salida del bloque que calcula el valor efectivo de la señal que se encuentra en bus de entrada entd(13:0), dando el resultado en el bus de salida salrms(16:0) con un retraso de 2,5 m, correspondientes a la toma de 64 muestras de la señal que se analiza. Este atraso no es significativo pues corresponde a un ciclo de la señal.

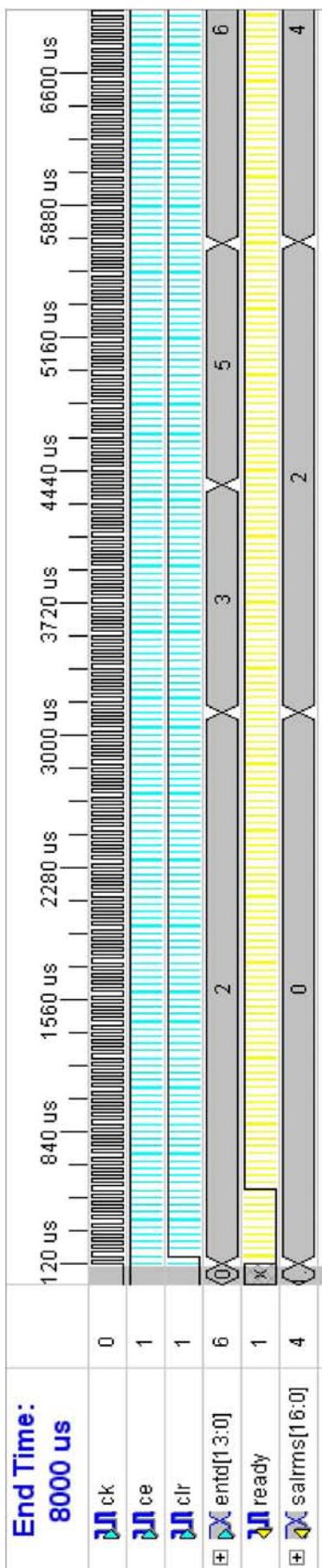
Tabla 1 Resultados del mapeo del circuito diseñado en la FPGA XC3S500E-4FG320C			
Tipo de elemento	Cantidad utilizada	Total disponible	Porcentaje del total
Slices	129	4 656	2
Slices Flip-Flops	109	9 312	1
4 input LUTs	194	9 312	2
Bonded IOBs	17	232	7
IOB Flip-Flops	3	-	-
GCLKs	2	24	8

Simulación del bloque DC0

En la figura 3 se muestra la simulación del bloque que detecta el cruce por cero de la señal que se muestrea. El pulso de salida que indica el cruce demora dos pulsos de reloj por los requerimientos del cálculo que se realiza en el bloque, pero es insignificante pues cada ciclo de la señal se muestrea 64 veces, es decir, con 64 pulsos de reloj, por lo que 2 pulsos equivalen al 3,1 % de un ciclo. Además, no es representativo pues este dato se utiliza en el cálculo de desfasaje de dos señales que en todo momento estarán en dos estados posibles: en fase o desfasadas 180°, no es preciso saber la fase con exactitud.

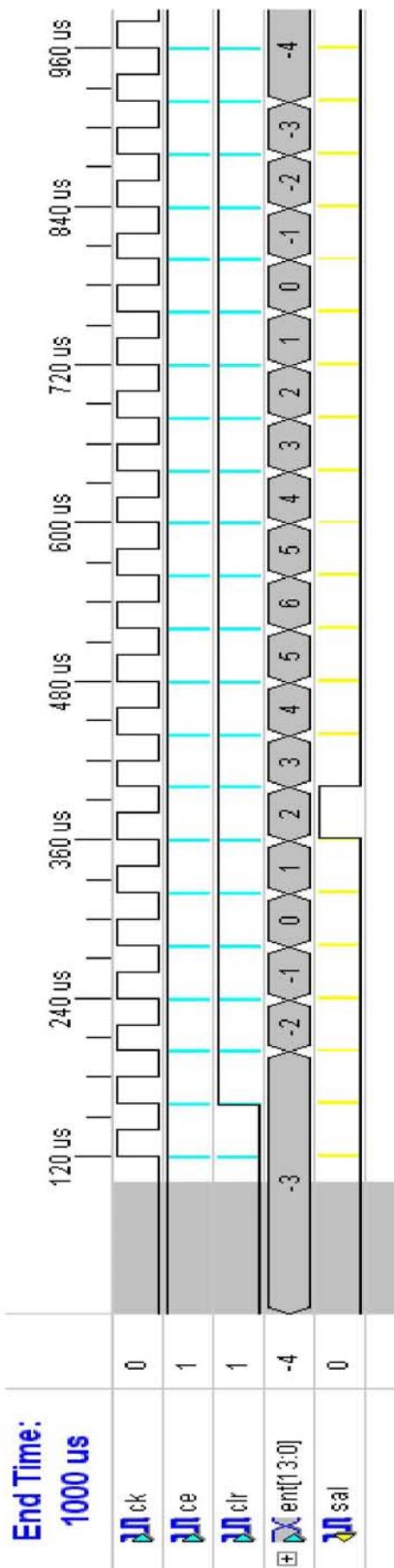
Simulación del bloque contador-desfasaje

En la figura 4 se muestran los datos de entrada y salida del bloque que tiene la función de calcular desfasaje entre dos señales. El conteo se inicia con el pulso de ent1 y termina con el de ent2, que inmediatamente que llega se genera la salida por s1 indicando el estado de fase. Para la simulación se pone el ejemplo de cuando las señales están aproximadamente en fase, teniendo en cuenta posibles corrimientos de las señales de cruce por cero positivo, y se aprecia como el bloque identifica un ángulo próximo a cero como ceropreciando esto.



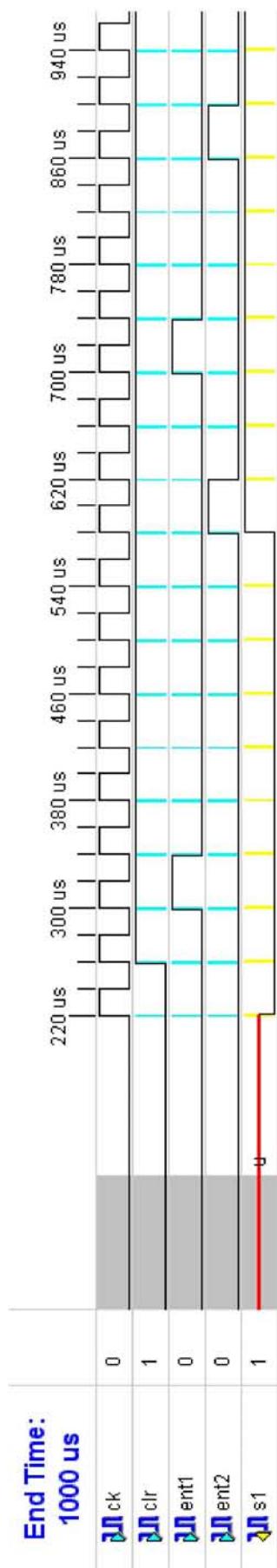
Datos de entrada y salida del bloque RMS

2



Datos de entrada y salida del bloque DC0.

3



Simulación del bloque comparador

En la figura 5 se muestran las variables de entrada y salida del bloque encargado de comparar las señales de error y referencia para indicar el estado de conexión del motor, para regular su velocidad. Se aprecia como mientras la ent2 es menor que ent1, el bloque tiene un 1 lógico en sal indicando que debe estar conectado, pero cuando se igualan ambas señales y/o sobrepasa la ent2 a ent1, el bloque genera un 0 lógico indicando que se debe desconectar.

Simulación del bloque de salida

En la figura 6 se muestra la respuesta del bloque PSGIRO a las señales de entrada sen y tp. Cuando sen vale 0, los pulsos de tp indicando conexión salen por el pin gd (giro derecho) y cuando sen vale 1 los pulsos salen por gi (giro izquierdo).

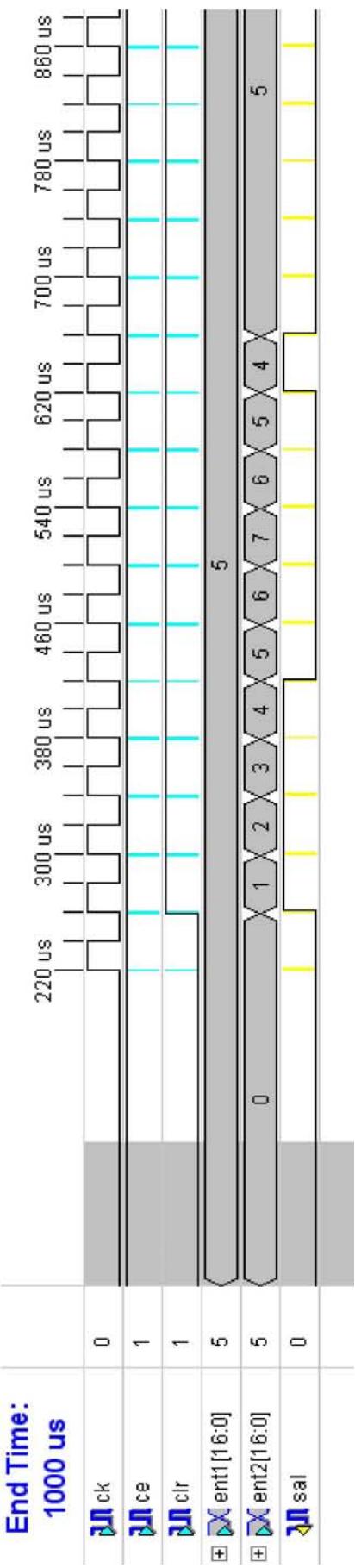
VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En cuanto a las características de hardware, la tecnología propuesta lleva la delantera por sus características de facilidad de reposición, compactibilidad y una muy importante, la posibilidad de reconfiguración del hardware sin extracción de elementos, ni tener que quitar siquiera el circuito de la zona de trabajo.²

En cambio, la tecnología analógica y digital convencional, una vez hecho el diseño, si se quiere hacer el más mínimo cambio es necesario desechar la placa confeccionada y construir una nueva, aumentando de esta forma el costo de producción. Para la tecnología propuesta, el costo de modernización sería nulo en cuanto a hardware, quedando para el costo únicamente la producción del bitstream necesario en la reconfiguración.

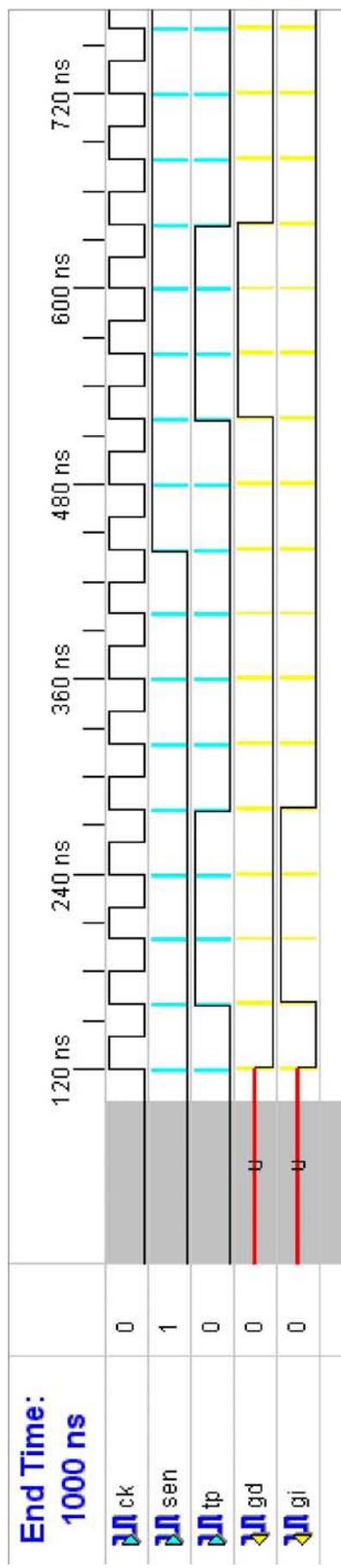
Con respecto a la tecnología analógica y digital convencional, el tiempo y costo de diseño y desarrollo de dispositivos y equipos, en la etapa de creación de la serie 0 y la de introducción es mucho mayor que la propuesta, ya que la misma conlleva la restricción del uso de los componentes finales, lo cual se ve disminuido con el uso de las técnicas de hardware programable pues el diseño se realiza mediante la programación directamente sobre el hardware que ya se encuentra en la placa consiguiendo obtener el prototipo una vez terminada la entrada de código.

La desventaja fundamental del hardware programable radica en la actualización del equipamiento de medición y de programación que debe contar cualquiera empresa o centro de estudio que la quiera introducir.



Datos de entrada y salida del bloque comparador.

5



Datos de entrada y salida del bloque de salida (PSGIRO).

6

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la estructura y funcionalidad de las FPGAs, al igual que el diseño del sistema de control digital específico para servomotores de corriente directa, así como se demostró que se puede diseñar, desarrollar e implementar un sistema digital de control que cumpla con los mismos requerimientos funcionales de un sistema analógico utilizando las técnicas de hardware programable.

REFERENCIAS

1. González, Juan: Convirtiendo el hardware en software: FPGA's, 2006. <http://x-ezine.todo-linux.com/x2/2x011-fpga.html>.
2. Parnell, Karen y Nick Metha: Programmable Logic Design Quick Start Handbook, ed. PN0402230 Rev.4, 2004.

AUTORES

Dennis Arce López

Ingeniero Electricista, Instructor, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:dennis.jae.edu.cual@electrica.cu
dennisal2004@yahoo.es

Sergio J. Fernández García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:sfg@electrica.cujae.edu.cu
sergiojfernandez@yahoo.com

Omar Fuentes Lorenzo

Ingeniero en Automática, Asistente, Universidad de Pinar del Río, Hermanos Saíz Montes de Oca, Pinar del Río, Cuba
e-mail:omarf@tele.upr.edu.cu

REVISTAS CIENTÍFICAS DE LA CUJAE EN FORMATO ELECTRÓNICO ¡VISÍTENOS!



• <http://revistascientificas.cujae.edu.cu>

ADQPCl: Placa de Adquisición de Datos con Fines Docentes

Francisco J. Quiles, Manuel A. Ortiz, Carlos D. Moreno y María Brox

Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica, Edificio Leonardo Da Vinci, Campus Universitario de Rabanales, Ctra. Madrid-Cádiz Km. 396-A, 14071 Córdoba-España
(e-mail: el1qulaf@uco.es)

Resumen

En este trabajo se presenta una de las placas de adquisición de datos que se ha desarrollado con fines docentes para su utilización en prácticas relacionadas con sistemas en tiempo real e informática industrial y se plantean algunas de las ventajas e inconvenientes frente a la utilización de placas comerciales. A lo largo del trabajo se detalla el diseño del hardware, en el que se ha priorizado la facilidad de programación, siendo ésta una de las ventajas frente a las placas comerciales. En estas prácticas es fundamental que el alumno tome conciencia de la importancia de la interfaz hardware-software, si se quiere conseguir un sistema fiable y que explote al máximo las características del hardware. Con el desarrollo de una placa de adquisición de datos se consigue un sistema que el alumno puede utilizar en varias asignaturas de su titulación que están relacionadas con el desarrollo y programación de sistemas empotrados.

Palabras clave: adquisición de datos, diseño hardware, sistemas empotrados, interfaz hardware-software, fines docentes

ADQPCl: Data Acquisition Board for Educational Purposes

Abstract

In this work a data acquisition board developed for educational use in subjects related to real-time systems and industrial computing, is presented. The main advantages and disadvantages of using these boards versus the use of commercial boards are discussed. The hardware design described along this work emphasizes the facility of programming the board, which is one of the main advantages versus the commercial boards. In these practices it is essential that student comprehend the importance of the hardware-software interface in order to obtain a reliable system which exploits in a maximum way the characteristics of the hardware. The development of a data acquisition board allows to obtain a system that the students can use in several course during his university career which are related to the development and programming of embedded systems.

Keywords: data acquisition, hardware design, embedded systems, hardware-software interface, educational objectives

INTRODUCCIÓN

En los laboratorios de Electrónica es habitual la utilización de placas de adquisición de datos como parte de la Instrumentación Virtual (Golberg et al., 2000) o como parte de los sistemas de control. Actualmente existe una amplia oferta comercial de Instrumentos Virtuales, que incluye incluso la correspondiente placa de adquisición de datos. Estos tienen el inconveniente de que suelen ser aplicaciones muy generales, por lo que no se adaptan completamente a nuestras necesidades docentes. Esto se soluciona haciendo un diseño a medida, según las necesidades de las prácticas a realizar en cada tipo de laboratorio. Existen numerosos trabajos que analizan las ventajas e inconvenientes de la Instrumentación Virtual frente a la tradicional (Grimaldi et al., 2005; Nedic et al., 2003). El grupo de trabajo del presente estudio ha desarrollado también varios instrumentos virtuales en su vertiente hardware y software (Quiles et al., 2006; Torres et al., 2002).

En cuanto a la utilización de las placas de adquisición en sistemas de control se pueden dividir las prácticas en dos grupos. Un grupo de prácticas serían aquellas en las que el objetivo principal es realizar el software de control. En estas prácticas interesa que el alumno preste su atención en los lazos de control y se utiliza la placa de adquisición como un recurso más del computador. Se utilizan habitualmente librerías que abstraen al programador del hardware de la placa. Para el otro grupo de prácticas, que se podrían denominar de informática industrial y/o de sistemas en tiempo real, es importante conocer el proceso de adquisición de datos y por tanto es necesario conocer el hardware y el software que maneja este hardware. Para llevar a cabo este objetivo se requiere por tanto disponer de toda la información detallada de la placa de adquisición.

En este último grupo de prácticas disponer de una placa de adquisición con fines docentes, donde se conozca minuciosamente el hardware y se haya simplificado su programación, reduce el esfuerzo del alumno, centrando su atención en otros aspectos de las prácticas proporcionando una importante ayuda en la labor docente.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA PLACA ADQPCI

La placa diseñada se puede englobar en la gama medio-baja, pero incluye todo lo necesario para implementar multitud de aplicaciones de control y de Instrumentación Virtual. En la Fig. 1 se muestra una fotografía de la placa ADQPCI. Sus características más importantes son:

- Conexión al bus PCI de 32 bits, 5V y 33MHz
 - ✓ Los periféricos se han mapeado en el espacio de E/S
 - ✓ Transferencias de 8 bits
- Conversión analógico-digital
 - ✓ 14 canales analógicos de entrada
 - ✓ 8 bits de resolución
 - ✓ Amplificador de ganancia programable: 1, 2, 4, 8 y 16
 - ✓ 1 LSB = 20 mV
 - ✓ Control del fin de conversión por programa e interrupción
- Conversión digital-analógica
 - ✓ 2 canales analógicos de salida
 - ✓ 8 bits de resolución
 - ✓ 1 LSB = 20 mV
- Temporizador/contador de eventos de 16 bits
- Registros de entrada y salida digitales
 - ✓ 8 entradas digitales dedicadas
 - ✓ 8 salidas digitales dedicadas accesibles a nivel de bit

Otra característica que se consideró imprescindible en el diseño, es que fuese muy fácil de programar, tratando de reducir al mínimo posible los pasos a seguir en la configuración. Por eso, se ha incluido dos registros digitales independientes, uno de entrada y otro de salida. De esta forma sólo hay que realizar el acceso de lectura (entrada) o de escritura (salida), sin necesidad de configurar la dirección del puerto, como sería el caso, si se hubiera optado por unos puertos

bidireccionales. El puerto de salida es direccionable bit a bit facilitando así la actuación sobre este puerto. Tampoco se han incluido buffers para los datos adquiridos en el conversor A/D, que aunque reducen las prestaciones simplifican en gran medida la programación.

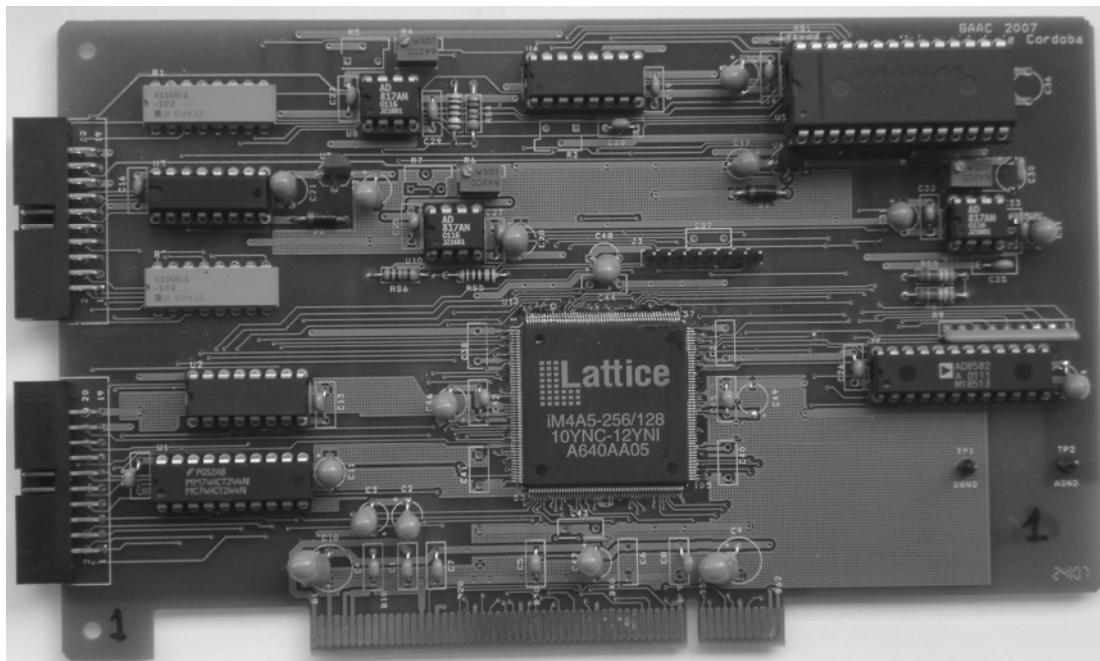


Fig.1: Vista superior de la placa ADQPCI.

DESCRIPCIÓN DE LA PLACA ADQPCI

En la figura 2 se indica el diagrama de bloques de la placa ADQPCI. El bloque de conversión analógico/digital consta de un conversor MAX118, que tiene 7 canales de entrada utilizables y 8 bits de resolución, un multiplexor analógico de 8 a 1, 74HC4051, y un amplificador de ganancia programable (AGP), AD526. Los 8 primeros canales analógicos de entrada se multiplexan mediante el 74HC4051 y la salida de éste se conecta al AGP. La conversión de estos 8 canales se realiza a través del primer canal de entrada del conversor. Los otros 6 canales de entrada se conectan a los restantes canales del conversor. Por tanto, sólo se puede configurar la ganancia en los 8 primeros canales de entrada. Para seleccionar el canal a convertir se debe configurar adecuadamente las entradas de selección, tanto del multiplexor como del conversor. La señal de fin de conversión se conecta al bloque de control.

El bloque de conversión digital/analógico consta de un conversor con 2 salidas (AD8582), que incluye el generador de tensión de referencia, y 3 amplificadores operacionales. Dos se usan para proteger y amplificar el nivel de salida, de forma que se obtenga una resolución de 20mV por LSB. El otro operacional se usa para generar la tensión de referencia al MAX118.

El registro de entrada se implementa mediante un buffer 74HC244 y el de salida mediante un latch 74HC259. Estos circuitos que implementan puertos digitales se han montado en zócalos para que sean reemplazados fácilmente, si se deterioran por una mala manipulación o conexión en prácticas.

El bloque de control se ha realizado mediante el CPLD ispM4A5-256/128 de Lattice Semiconductor (<http://www.latticesemi.com>), que es programable a través del conector JTAG. Realiza las siguientes funciones:

- Un interfaz básico al bus PCI, que incluye el espacio de configuración y un segmento de E/S de 256 bytes para poder acceder a los distintos periféricos de la placa.
- Decodificador de direcciones que genera las señales de selección de los periféricos.

- Generador de estados de espera al bus PCI según el periférico al que se acceda.
- Obtener un bus de datos de 32 bits para el espacio de configuración y otro de 8 bits que conecte a todos los componentes de la placa.
- Temporizador/contador de eventos de 16 bits.
- Registro de lectura para determinar el estado de la placa: fin de conversión y fin del timer.
- Controlador de interrupciones, que incluye un bit de máscara y un EOI (fin de interrupción) para cada una de las dos peticiones: fin de conversión y fin de cuenta del timer.
- Registro de selección de canal analógico de entrada y conversor de código.

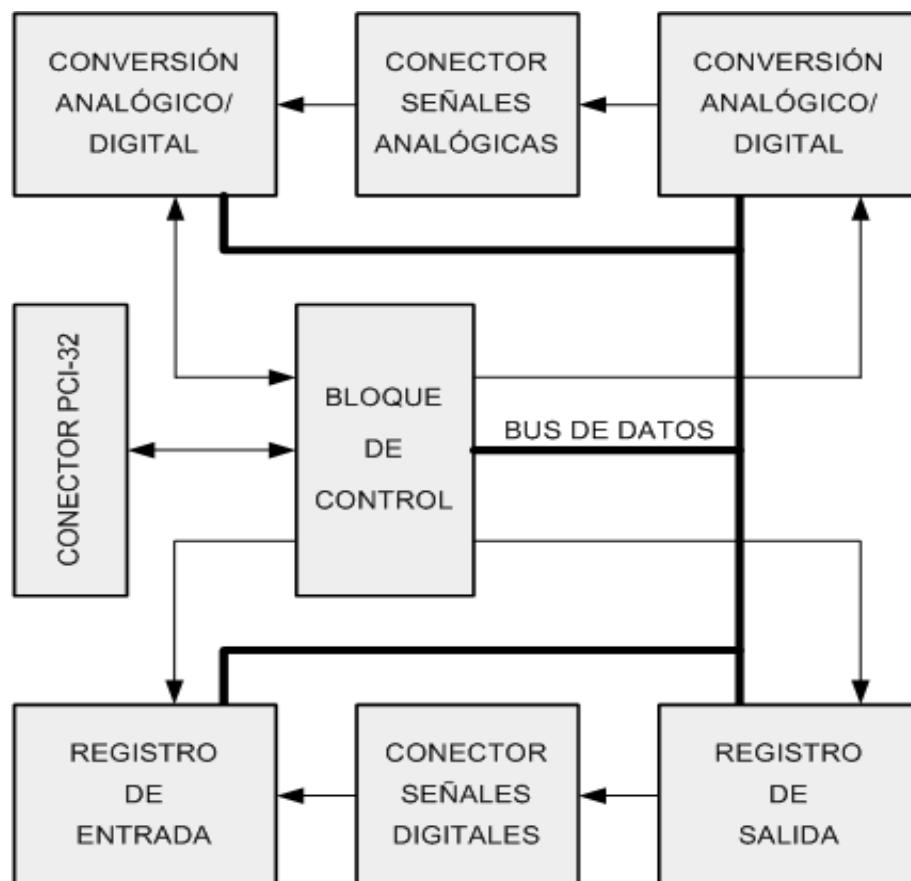


Fig. 2: Diagrama de bloques de la placa ADQPCI.

Para facilitar al programador la selección del canal a convertir, se ha realizado un conversor de código, que a partir del contenido del registro de selección genera adecuadamente las señales de selección al multiplexor y al conversor A/D. Así, el programador solamente tiene que escribir en el registro de selección el número binario del 0 al 13 que identifica el canal.

La descripción del diseño del CPLD se ha realizado en VHDL (Ashenden, 1996) y se ha sintetizado mediante la herramienta isPLEVER Starter V6. La programación se realizó a través del conector JTAG mediante la herramienta ispVM SYSTEM V16. Ambas son proporcionadas gratuitamente por Lattice Semiconductor (<http://www.latticesemi.com>).

VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LA PLACA ADQPCI EN PRÁCTICAS

Una vez realizada una simple clasificación en la introducción de las diferentes prácticas que se suelen realizar en los laboratorios de Electrónica, cabe decir, en lo que se refiere a Instrumentación Virtual, que la mayoría de las veces se prefiere un sistema comercial por estar más depurado, tener numerosas prestaciones, y no tener que dedicar recursos a su diseño y desarrollo. Aunque a veces se olvida que el desarrollo de sistemas electrónicos contribuye en gran medida tanto a la formación del profesorado como del alumnado.

En el grupo de prácticas relativas a Informática Industrial y Sistemas en Tiempo Real se requiere tener unas placas de adquisición de datos propias, como la que se presenta, de la que se disponga de toda la información relativa al hardware y modo de programación, ya que parte del objetivo de estas prácticas es que el alumno conozca cómo se lleva a cabo la adquisición de datos en un sistema computacional. Incluso en la asignatura de Informática industrial de I.T.I. Electrónica Industrial, se puede describir el hardware de la placa, que se empleará en prácticas, como ejemplo de sistema de adquisición de datos.

Por otro lado, en la asignatura de Sistemas Informáticos en Tiempo Real de Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial, se necesita tener una placa de adquisición que sea sencilla de programar, para que el alumno centre su atención en la programación del sistema operativo y en el estudio de los tiempos de ejecución de la aplicación y las tareas que la formen. Además en este tipo de sistemas es esencial que el alumno conozca la interacción hardware-software (Kooman et al., 2005).

Independientemente de lo comentado anteriormente, a lo largo de los estudios, el alumno tiene que utilizar algún sistema operativo de propósito general y algún sistema operativo en tiempo real. En este caso es difícil encontrar un fabricante de placas de adquisición de datos que proporcione librerías adecuadas para todos los sistemas operativos utilizados. En el caso de la titulación de I. en Automática y Electrónica Industrial de la Universidad de Córdoba el alumno utiliza Windows (<http://www.microsoft.com>) y el sistema operativo en tiempo real *Phar Lar ETS* (<http://www.ardence.com/embedded>). Habitualmente se utilizan placas distintas por no disponer de librerías para estos sistemas operativos. Además en algunas asignaturas optativas también se utiliza el sistema operativo *VxWorks* (<http://www.windriver.com/vxworks>). Si se tiene una placa en la que se conozca el hardware y el mapa de registros, una vez escritas las funciones básicas se pueden adaptar a cualquier sistema operativo en tiempo real, y por tanto se simplifica el esfuerzo de programación del alumno.

Por supuesto, cabe decir, que para muchos docentes, el esfuerzo de desarrollar una placa de adquisición de datos con fines docentes y el conjunto de unas librerías básicas para su manejo no está justificado y se opta por la compra de una placa comercial. Para otros docentes, entre los que se encuentran los autores de este trabajo, es fundamental el diseño y desarrollo de hardware como una labor docente más. Otros docentes, muestran incluso la necesidad de ampliar en el diseño hardware del sistema, los contenidos de algunos cursos de diseño de sistemas empotrados, que se imparten en Universidades Europeas (Bertels et al., 2007).

EXPERIENCIA DE LA UTILIZACIÓN DE LA PLACA ADQPCI EN PRÁCTICAS

La placa ADQPCI se está utilizando en la asignatura de Sistemas Informáticos en Tiempo Real de la titulación de Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial de la universidad de Córdoba. Los resultados han sido satisfactorios y justifican el esfuerzo realizado en su desarrollo. El profesor de prácticas conoce en detalle el hardware de la placa y el interfaz que presenta al bus PCI, pudiendo argumentar mucho mejor las operaciones que se deben realizar en la placa.

Entre las funciones que deben codificar los alumnos, está la programación de una función que localice la placa en el bus PCI y localice la interrupción asignada. Una vez localizada la placa debe obtener su dirección base y puede comenzar a operar con ella. Con esta placa se puede mostrar el proceso de configuración de dispositivos en el bus PCI.

A continuación se exponen el conjunto de registros que, dada la sencillez de la placa, se reduce a una decena. Posteriormente se agrupan los registros y se detalla la programación para los puertos digitales, conversores, etc. De acuerdo a cada práctica el alumno programa uno de los interfaces y realiza operaciones con ellos, que posteriormente se comprueban con el osciloscopio. Durante el curso el alumno no requiere de ninguna función para la realización de las prácticas que no haya sido desarrollada por él.

CONCLUSIONES

La placa ADQPCI ha sido diseñada priorizando la simplicidad y la sencillez sin perder prestaciones. Se tiene en una sola placa conversión A/D, conversión D/A, puertos digitales y timers. Se han utilizado conectores simples y robustos que facilitan la labor del alumno en los laboratorios de electrónica. Los circuitos integrados con conexión al exterior se han montado en zócalos lo que facilita su sustitución.

Se conoce con detalle los mapas de registros y los tiempos de adquisición y está pensada para que se programe simple y fácilmente y así el alumno pueda aprovechar mejor el tiempo de prácticas. En este sentido se han seleccionado circuitos de conversión sencillos; los puertos digitales son unidireccionales, de entrada o salida; la programación del canal para la conversión se realiza con una sola escritura en un registro; no se han incluido buffers intermedios para los datos adquiridos y la placa se ha mapeado en el espacio de entrada/salida del bus PCI.

La utilización de la placa de adquisición de datos ADQPCI en la asignatura de Informática Industrial de la titulación de I.T.I. Electrónica y en la asignatura de Sistemas Informáticos en Tiempo Real de la Titulación de I. en Automática y Electrónica Industrial presenta numerosas ventajas frente a una placa comercial debido a su sencillez como se ha comentado anteriormente. Por un lado se tiene un ejemplo real y permite describirla con detalle en la asignatura de Informática Industrial y, por otro lado, su utilización en las prácticas de la asignatura de Sistemas Informáticos en Tiempo Real ahorra esfuerzo al profesor y al alumno por la sencillez de su programación y permite además realizar prácticas con la misma placa en distintos sistemas operativos en tiempo real.

REFERENCIAS

- Ashenden P.J., *The Designer's Guide to VHDL*, 1a ed., Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, USA (1996).
- Bertels P. y otros tres autores; *Gathering Skills for Embedded Systems Design*, Proceedings of 3th Workshop on Embedded Systems Education: 30-35 (2007).
- Goldberg H.; *What is virtual instrumentation?*, IEEE Instrum. Meas. Mag.: 3, 10–13 (2000).
- Grimaldi, D. y otros dos autores; *Aspects of Traditional versus Virtual Laboratory for Education in Instrumentation and Measurement*, Instrum. and Meas. Tech. Conference: 2, 1233 – 1238 (2005)
- Koopman P. y otros doce autores; *Undergrate Embedded System Education at Carnegie Mellon*, ACM Transactions on Embedded Computing Systems: 4(3), 500–528 (2005).
- Nedic, Z. y otros dos autores; *Remote laboratories versus virtual and real laboratories*, Frontiers in Education: 1 (2003)
- Quiles F. J. y otros cinco autores; *Analizador lógico virtual para ordenador personal*, Actas del 7º Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, 263-264, Madrid-España (2006).
- Torres J. y otros tres autores; *Osciloscopio Virtual para PC: diseño e implementación del soporte hardware*, Actas del 5º Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, Las Palmas de Gran Canarias-España (2002).



VARONA

ISSN: 0864-196X

hildelisagp@ucpejv.rimed.cu

Universidad Pedagógica Enrique José Varona
Cuba

Piñón-González, Josefina Caridad
Integración científica e interdisciplinariedad
VARONA, núm. 54, enero-junio, 2012, pp. 16-21
Universidad Pedagógica Enrique José Varona
La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=360633906004>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Integración científica e interdisciplinariedad

Scientific Integration and Interdisciplinary Teaching

Dr C Josefina Caridad Piñón-González. Profesora Titular. Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”. La Habana, Cuba. Correo electrónico: josefinapg@ucpejv.rimed.cu

Recibido septiembre de 2011 Aceptado diciembre de 2011

RESUMEN. El artículo aporta elementos que contribuyen a esclarecer la concepción de integración científica e interdisciplinariedad para lograr, en la formación de postgrado, cambios que conduzcan a una sólida introducción de resultados en la práctica educativa. Se parte del criterio de que la actividad científica educacional en las universidades de ciencias

pedagógicas constituye hoy, como nunca antes, un compromiso esencial de cualquier estrategia de desarrollo, donde se conjugan de manera armónica las exigencias que traza la integración científica en el quehacer educativo, condición esencial para poder alcanzar un mayor protagonismo en el mejoramiento educativo y el desarrollo de las ciencias de la educación.

PALABRAS CLAVE: integración, ciencia, interdisciplinariedad, educación.

ABSTRACT. This article brings elements which contribute to explaining the conception of scientific integration and interdisciplinary teaching to obtain in the formation of postgraduate courses changes which bring about a solid introduction of the results in the educative practice. This stems for the criteria that the educational scientific activity in pedagogical science

university, constitutes today as never before an essential responsibility of any development strategy wherein the demands of scientific integration of any educative process is in harmony, a condition that is essential to be able to reach higher protagonist role in the betterment of education and the development of educative sciences.

KEY WORDS: integration, science, interdisciplinary, education.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las ciencias reclama la unidad entre los procesos de integración, donde el conocimiento científico y su utilización para la transformación de la realidad es una necesidad insoslayable. En el siglo XIX las investigaciones científicas mostraban la existencia de puntos de contacto que partían de los descubrimientos científicos de las diversas ramas del saber. Esta integración era posible si se tomaba en cuenta la precisión del objeto y los saberes que contribuían al desarrollo de las fuerzas productivas y a las demandas de la práctica social.

Desde el siglo XX existían experiencias relativamente estables que revelaban el predominio de la tendencia integracionista en el desarrollo del sistema de conocimientos científicos. En el siglo XXI es una necesidad la solución y la respuesta de la demanda social.

Lo antes expresado pone de manifiesto el surgimiento de nuevos y complejos puntos de encuentros e interacciones entre las ciencias que muestran el acercamiento, cada vez mayor, entre las ciencias naturales, exactas y las humanidades, y el papel diferenciado de los métodos generales del

conocimiento científico. La utilización de los métodos matemáticos por todas las ciencias, incluyendo las sociales, le otorgan mayor objetividad a los descubrimientos científicos y garantizan la relación entre lo cuantitativo y lo cualitativo, con el fin de generar nuevas formas de interpretar y proyectar el desarrollo sociopolítico y económico de la educación.

Cuanto más se desarrolla la diferenciación de las ciencias, tanto más se crean las posibilidades para su integración; esto permite el incremento de grupos multidisciplinarios de investigadores que acceden a nuevos y complejos puntos de encuentro con una visión cooperativa, colaborativa e interdisciplinaria desde una concepción ética profesional. Ello conduce a considerar que la integración científica es un proceso de interrelación complejo, dinámico e interdisciplinario, que se realiza para el estudio o la solución de un problema científico identificado.

DESARROLLO

Diferentes acepciones sociopolítico-económicas existen alrededor del constructo integración, pero no es menos cierto que en el siglo XXI es importante tener en cuenta que es un factor elemental en el quehacer

de la ciencia y para el desarrollo humano. Hay quien considera que el concepto de integración está lleno de buenas intenciones; para otros, como algo ideal; para los cubanos, como una noción clave y viable para erradicar las limitaciones que enfrenta el contexto nacional como el internacional.

En Cuba la investigación educativa organizada en programas y proyectos es el componente esencial de la actividad científica educacional y su finalidad es la de "...producir determinados resultados científico-técnicos que posibilitan describir, explicar, predecir y transformar el objeto en correspondencia con los problemas inmediatos y perspectivos del desarrollo de la educación en un contexto histórico concreto".¹ Por ello, "la introducción de resultados de investigación constituye el hilo conductor de las relaciones que se establecen entre los componentes de la actividad científica educacional".²

Para lograr la introducción de resultados científicos de forma eficiente la palabra de orden es *integración*, "...hay que trabajar por alcanzar resultados científicos entre proyectos; por la sistematización teórico-práctica, (...) por lograr proyectos de integración donde otras instituciones aporten y en conjunto logren introducir resultados con una mayor efectividad presente y proyectiva".³ No cabe duda de que promover la integración para la introducción de resultados científicos entre las universidades de ciencias pedagógicas y entre estas y el entorno social responde especialmente a elevar las potencialidades y las virtudes de la comunidad científica, para contribuir al desarrollo de la calidad de la educación. Ello responde al Lineamiento 137 del VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, que refiere: "Continuar fomentando el desarrollo de las investigaciones sociales y humanísticas sobre los asuntos prioritarios de la vida de la sociedad, así como perfeccionando los métodos de introducción de sus resultados en la toma de decisiones a los diferentes niveles".⁴

Hay especialistas que opinan que la integración es un fenómeno complejo, sin definición unívoca, que se produce como consecuencia de la adaptación a las respuestas del individuo, según los requerimientos del medio y de la interacción entre ambos; otros consideran que es un proceso dinámico y, a la vez, el producto o resultado de este proceso. El Diccionario Ilustrado de la Lengua Española "ARISTOS" considera que integrar es dar integralidad a una cosa, componer un todo con sus partes integrantes⁵; algunos autores prefieren denominarlo como asimilación, para referirse a la adaptación de los individuos a una determinada jerarquía de forma social. Lo cierto es que si se estudia la parte, hay que buscar la manera de transparentar el todo a través de esta, condición que propone la teoría de la complejidad como parte del estatuto para la ciencia en la nueva era del conocimiento.

Domínguez L enfatiza que en las Ciencias Sociales y Humanísticas existe un grado de dispersión

de los resultados, dado por la falta de integración que ocasiona carencias de salida hacia la práctica.⁶ Ello permite considerar que existen insuficiencias en la planificación y la organización de los resultados científicos en función de los problemas comunes entre instituciones educativas, ocasionado, en gran medida, por el incremento de diferentes formas de integración, recurso necesario para generar nuevos conocimientos y tecnologías mediante la articulación entre la práctica social, el conocimiento y los valores que se dan en los procesos participativos y en donde se involucran activamente los sujetos comprometidos en dar respuesta a las necesidades educativas.

Castro F considera que la integración en la esfera de la investigación científico-tecnológica es un concepto más abarcador, que no trata solo el caso de la cooperación, del intercambio del resultado científico, de la colaboración de una misma rama, o la utilización en común, por diferentes instituciones, de recursos materiales, entre otros, sino una nueva perspectiva del sistema de ciencia, tecnología y desarrollo, que implica, sobre todo, la comprensión de la necesidad de una interrelación a un nivel más amplio de todas las ramas del saber científico, con vistas a esa visión totalizadora de la sociedad y de las vías para alcanzar un progreso multilateral.⁷

Núñez J afirma que la ciencia y la tecnología son procesos sociales,⁸ indudablemente que para la educación científica tiene un valor significativo lo expresado por el citado autor, si se parte de su implicación en la formación permanente de las personas. En la medida que se necesitan nuevos conocimientos se logra una visión diferente del mundo, no cabe duda que aceptar que se vive en una sociedad de conocimiento es reconocer que estos llegan a ser obsoletos, dado por el propio desarrollo social; esto impone nueva información centrada en la superación permanente, de ahí que la educación tiene que ser creciente a favor del desarrollo humano.

Entender la ciencia como una fuerza social integral, en la unidad de todas sus ramas: ciencias naturales, ciencias técnicas y ciencias sociales, permite una utilización plenamente científica de todos sus resultados y logros; es decir, "una utilización que responda cabalmente a los intereses y valores esenciales del individuo de la humanidad".⁹ Para Lahera I las complejas transformaciones que reclama el siglo XXI están identificadas por el principio que lleva a que la ciencia actúe como "valor auténticamente humano".¹⁰ Desde este principio se puede entender la realización, unidad e interpretación de los aspectos científicos y valorativos de la actividad científica. Lahera reconoce que hay un valor de la ciencia en relación con la sociedad y la propia ciencia que tiene aspectos valorativos, por lo que puede ser entendida como una forma de actividad valorativa y orientadora. De hecho, las actividades científicas y valorativas deben ser fuerzas complementarias que parten de la relación

teoría-práctica y que, mediante ella, se logra interpretar la realidad, conocer las limitaciones, sus causas y consecuencias, y buscar alternativas de solución a los complejos problemas existentes, especialmente en el sistema educativo.

Las ideas acerca de la concepción teórico-metodológica que asume la integración científica desde los componentes de la actividad científica educacional son interpretadas a partir de lo expresado por Escalona E, al identificarla “como célula básica del desarrollo”,¹¹ donde mediante sus aportes se logran vías de solución a problemas educativos previamente diagnosticados. Ello posibilita tener en cuenta la relación armónica entre los resultados por proyectos con los programas de maestrías y estos, en orden cualitativamente superior, con los programas de formación doctoral.

La autora del presente artículo considera necesario que los especialistas asuman la integración científica como una herramienta para proyectar el camino de búsqueda de solución a determinado problema científico, que si bien no dejan de ser trabajados por investigadores de las universidades de ciencias pedagógicas, aun no es suficiente. Para ello, es necesario interpretar la relación integración-interdisciplinariedad, que tiene por núcleo la sistematización como una vía de búsqueda de experiencias para volver a la práctica con resultados cualitativamente superiores.

La sistematización es entendida como un proceso de reflexión y análisis crítico de las experiencias en manos de sus propios actores que permite descubrir, a partir de la identificación de los aciertos y errores de las investigaciones, los elementos claves que influyen

en la obtención de determinados resultados. No se trata de medir consecuencias y logros para recomendar modificaciones y proponer mejoras; la sistematización se interesa en “recuperar” las experiencias vividas para analizarlas e interpretarlas crítica y ordenadamente con el fin de extraer aprendizajes que permitan mejorar la práctica. Ello requiere de la interpretación de una o varias experiencias que, a partir de su ordenamiento y reconstrucción, descubra o explique la lógica del proceso, los factores que han intervenido en él, cómo se han relacionado entre sí y por qué lo han hecho de ese modo.

Es así que la integración científica mediante la sistematización teórico-práctica adquiere relevancia hacia el interior de la capacidad y el compromiso de los profesionales de la institución, responsables de construir el conocimiento (investigación) y valorar sus acciones (evaluación con coherencia y cohesión). La importancia de la sistematización en el desarrollo de la integración científica permite establecer la relación entre investigación, sistematización y evaluación, a partir de que la investigación produce aportes teórico-prácticos; la sistematización, sentidos de interpretación y la evaluación, interpretación de los niveles de ejecución de los objetivos de un determinado proceso. Ello admite afirmar que la investigación-sistematización-evaluación constituyen una unidad dialéctica, donde cada uno de los procesos tiene su propia metodología y, en su unidad, una intención: lograr el crecimiento profesional de los investigadores en función del desarrollo cualitativo de la educación. La esencia metodológica planteada transita por un camino predominantemente cualitativo (Fig. 1).

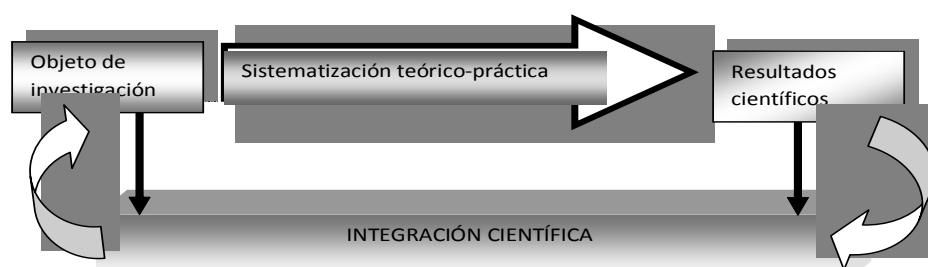


Fig. 1. Relación entre objeto, sistematización y resultado científico.

LA RELACIÓN INTEGRACIÓN-INTERDISCIPLINARIEDAD

Frecuentemente se confunden los términos integración-interdisciplinariedad que, según Perera F, son expresiones que entre los profesores constituyen ser “pensamiento docente o ideas de sentido común”.¹² Para el citado autor, la relación dialéctica y de complementación entre ambos términos está

centrada básicamente en que se asume la interdisciplinariedad como un proceso que tiene por resultados, en diferentes etapas, la integración de los contenidos y de los procesos de aprendizaje, con un progresivo aumento de su grado de complejidad; sin embargo, hay quien considera que no existe relación entre integración e interdisciplinariedad porque los aportes son retazos que carecen de suficientes elementos teóricos que no son llevados consecuentemente a la práctica.

Es importante destacar que integrar significa concebir el todo, en una relación interactiva compuesta y en donde el intercambio científico, la colaboración y la cooperación son procesos que permiten interpretar la práctica educativa con la implicación directa de todos los implicados.

El intercambio científico, hacia dentro y hacia fuera de la universidad, teniendo lugar la elevación de su calidad intrínseca, al mismo tiempo que se abre al entorno, a la satisfacción de sus necesidades y a la búsqueda de nuevas experiencias para su ulterior desarrollo.

Rojas C y Piñón J afirman que “el intercambio científico es el proceso mediante el cual tiene lugar la influencia científica recíproca de la universidad y su entorno, conducente al mejoramiento acelerado de la práctica social, en general, y de la ciencia, en particular”.¹³ Para el caso específico de las ciencias pedagógicas, el intercambio científico presupone, ante todo, el mejoramiento de la práctica educativa, tanto escolar, como universitaria, y el desarrollo de las ciencias de la educación.

En el intercambio entre investigadores debe prevalecer la ética de saber escuchar a aquellos con diferentes posiciones científicas, como también de dar espacio para el aporte de experiencias que respondan al objetivo deseado. Ajustar los resultados a un contexto determinado, evitar repeticiones de un objeto de estudio por diferentes instituciones e, incluso, en una misma institución, exige de un diálogo abierto, ético, donde se establezcan compromisos de trabajo que resulten beneficiosos para el mejoramiento de la práctica social, incluido el propio desarrollo de la ciencia, como expresión esta última del resultado más elevado al que se debe aspirar en el proceso de integración.

La cooperación, dirigida a establecer un trabajo científico coordinado entre los investigadores cuya tendencia no sea modificar el trabajo científico individual, sino potenciar el carácter socializador y colectivo, encaminado a encontrar alternativas que faciliten el cambio o perfeccionamiento del objeto investigado. No se trata de realizar una revisión de conceptos y contenidos de la ciencia de estudio; si bien es necesario encontrar nexos y relaciones, lo más importante es lograr el cambio de mentalidad de los sujetos implicados con la responsabilidad de aportar al desarrollo educativo.

Chávez J, Báxter E y Valdés H argumentan que el que coopera recibe cooperación; además, especifican que la cooperación no es un mero regateo en que el éxito de una persona se logre a expensas o gracias a la exclusión del éxito de los demás.¹⁴ Ello permite afirmar que el objetivo constante de la cooperación es el beneficio mutuo en las interrelaciones humanas.

En tal sentido, la cooperación se concibe atendiendo a un enfoque teórico-metodológico, que permite lograr la integración de los resultados producto de las investigaciones por proyectos, con el fin de

generar nuevas integraciones en el proceso de su introducción. Ello permite declarar tres niveles de integración a partir de los resultados teórico-prácticos de cada proyecto de investigación, donde se han de revelar criterios comunes desde tareas diferentes derivadas del propio intercambio.

Niveles de la cooperación desde la integración científica:

1. Nivel de integración de la ciencia, la tecnología y la sociedad.
2. Nivel de integración del objeto de estudio.
3. Nivel de integración de los participantes.

La consideración de los tres niveles mencionados puede orientar una mejor evaluación del alcance real. El primer nivel tiende a integrar el producto esperado a la demanda social desde una perspectiva de búsqueda científica y de inversión de esfuerzos. Es decir, se pone la ciencia al servicio del desarrollo cultural-social. El segundo nivel implica la asunción de determinadas posiciones teórico-metodológicas con visión interdisciplinaria y el tercer nivel se refiere al desarrollo personal.

Trabajar en equipo exige la búsqueda multilateral de posiciones teórico-prácticas, tener conocimiento interdisciplinario y asumir posturas críticas y no dogmáticas con respecto al objeto de investigación y su aplicación. Como se aprecia, es importante la visión integral de los tres niveles propuestos y, para ello, es necesario tener presentes:

- Los valores (responsabilidad de los participantes, prestigio profesional, compromiso institucional e individual, entre otros).
- El desarrollo del pensamiento complejo/crítico, con visión de cambio, de perfeccionar el objeto de investigación.
- La capacidad para la elección de teoría(s) apropiada(s), con el fin de que se convierta(n) en herramientas de trabajo para una mejor acción o transformación práctica.
- Voluntad de cambio que derive la actualización permanente de los participantes.

La colaboración, regida por el compromiso individual y colectivo de resolver eficazmente los problemas educativos y trazar acciones conjuntas que respondan a las nuevas realidades surgidas de las contradicciones de la práctica educativa.

Como cualquier contradicción, su solución debe transitar por un proceso de búsqueda científica, esencialmente de carácter participativo, donde todos los miembros de la comunidad universitaria y de otras afines a la misión educativa, aporten alternativas para vencer los obstáculos de naturaleza objetiva y subjetiva que puedan limitar el trabajo científico. La solución de esta contradicción es un momento esencial en el proceso de elaboración de los planes estratégicos de desarrollo social, tanto para la adecuada proyección de trabajo científico, como para el apoyo a la

realización de los restantes procesos universitarios y el logro de las metas que se propongan.

En cuanto a la interdisciplinariedad, se conocen las variadas concepciones que le atribuyen diversos autores, como: principios, procesos, forma de organizar acciones, entre otras; según Perera F, ninguna es excluyente, sino que se complementan y coexisten,¹⁵ de modo que según la situación, así serán asumidas.

Según Martínez B N, integrar significa “concebir el todo, en una relación interactiva compuesta por diferentes elementos vinculados entre sí, lo que implica la utilización de síntesis, el todo, y el análisis, la descomposición en los elementos que la conforman, como operaciones mentales del pensamiento”.¹⁶ Ello permite considerar que la interdisciplinariedad presupone el camino para la solución de la contradicción dialéctica entre el conocimiento totalizador y el especializado, donde su resultado es la integración del conocimiento.

Para Abad G, desde la Didáctica la integración es un proceso de ordenación lógica y jerárquica de la estructura cognoscitiva del estudiante, que emerge de la sistematización, a través del establecimiento de relaciones precedentes, concomitantes o perspectivas entre los contenidos adquiridos en un mismo o diferente contexto de enseñanza-aprendizaje, como resultado del cual se logra una comprensión, explicación e interpretación holística de la realidad y, en consecuencia, una actuación activa, transformadora y creadora en situaciones concretas.¹⁷ Se comparte con Perera F al considerar que esta autora interpreta la interdisciplinariedad como la vía de operar en la práctica para la correspondiente integración, “donde la primera da lugar a la segunda”.¹⁸

Es importante destacar que la interdisciplinariedad no es un fin, sino un medio para lograr la integración de los procesos de aprendizajes y de los saberes, así como su movilización y su aplicación en situaciones concretas. En el caso de la formación permanente, Miranda T convoca a la comunidad científica de la Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona” a interpretar la integración científica como el proceso de interrelación complejo, dinámico e interdisciplinario que se realiza entre los distintos proyectos de investigación con el propósito de articular los distintos proyectos de investigación en función de lograr calidad educativa en la formación integral de los estudiantes que aspiran a egresar de las distintas carreras pedagógicas.¹⁹ Es decir, que la integración científica es un proceso dinámico; por ello, es necesario conocer qué se quiere integrar, con quién se cuenta, cómo realizar la integración, con el fin de que conduzca a trazar acciones cooperadas dirigidas a dar respuesta a las necesidades de la práctica educativa.

CONCLUSIONES

La integración científica permite participar de los resultados con el compromiso de generar nuevos saberes, en función del crecimiento profesional de los implicados y de las transformaciones educativas que se generan de las investigaciones en diferentes áreas del conocimiento.

La actividad científica educacional en las universidades de ciencias pedagógicas constituye hoy, como nunca antes, un compromiso esencial de cualquier estrategia de desarrollo que se proponga conjugar, de manera armónica, las exigencias que traza la integración científica en el quehacer educativo, condición esencial para poder alcanzar un mayor protagonismo en el mejoramiento educativo y el desarrollo de las ciencias de la educación.

En el proceso de introducción de resultados científicos, la interdisciplinariedad conduce a la planificación y al desarrollo de la integración científica, dirigida a conocer más de una manera de pensar la ciencia; confrontar las distintas explicaciones que la ciencia tiene del mismo fenómeno; pensar en las condiciones de producción histórica del conocimiento científico, utilizar el conocimiento para dar respuesta a las necesidades educativas y valorar, en el accionar interno de la ciencia, lo que los resultados externos pone en él.

REFERENCIAS

- ¹CASTELLANOS B, ET AL. Ecro para la investigación educativa. Resultado del proyecto: La Gestión de la Actividad de Ciencia e Innovación en el sector educacional. La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico “Enrique José Varona”; 2005. p. 34.
- ²ESCALONA E. Estrategia de introducción de resultados de investigación en el ámbito de la actividad científico-educacional. [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Pedagógicas]. La Habana, Cuba: Ministerio de Educación; 2008. p.38.
- ³DOMÍNGUEZ L. Intercambio con los jefes de programas ramales del Ministerio de Educación. La Habana, Cuba: Dirección de Ciencia y Técnica del Ministerio de Educación; 2009.
- ⁴PARTIDO COMUNISTA DE CUBA (PCC). VI Congreso del PCC. Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución. La Habana, Cuba. Aprobado el 18 de abril del 2011.
- ⁵DICCIONARIO ILUSTRADO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. ARISTOS. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación; (s/a).
- ⁶DOMÍNGUEZ L. Intercambio con los jefes de programas ramales del Ministerio de Educación. La Habana, Cuba: Dirección de Ciencia y Técnica del Ministerio de Educación; 2009.
- ⁷CASTRO F. III Taller La universidad en la Batalla de Ideas. Rev Bohemia, Año 96, abril 7, 2004.
- ⁸NÚÑEZ J. La ciencia y la tecnología como procesos sociales. Lo que educación científica no debería olvidar. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela; 2007. p.56.

- ⁹RODRÍGUEZ Z. OBRAS. Ciencia y valor. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación; 2001. p.212.
- ¹⁰LAHERA I. Enfoques contemporáneos para el estudio de los problemas sociales en la relación ciencia-cultura-educación-valores. Revista Científico-Metodológica Realidad y Perspectiva Educativa. No. 2, ene 2011. Caracas, Venezuela, p.90.
- ¹¹ESCALONA E. Estrategia de introducción de resultados de investigación en el ámbito de la actividad científico-educacional. [Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Pedagógicas]. La Habana, Cuba: Ministerio de Educación; 2008. p.38.
- ¹²PERERA F. Proceso de enseñanza-aprendizaje. Interdisciplinariedad o integración. Rev Varona, No. 48-49. La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico “Enrique José Varona”; 2009. p.45.
- ¹³ROJAS C, PIÑÓN J C. La dirección de la actividad científica educacional en el ser y el quehacer de la universidad pedagógica cubana. Rev Varona, No. 47, (14-20), jul-dic, La Habana, Cuba, Instituto Superior Pedagógico “Enrique José Varona”; 2008. p.18.
- ¹⁴CHÁVEZ J, BÁXTER E, VALDÉS H. Clasificación de los valores desde el prisma de diferentes autores. En: La educación en valores y la relación con la evaluación de su calidad. La Habana, Cuba: Editora Política; p.76.
- ¹⁵PERERA F. Proceso de enseñanza-aprendizaje. Interdisciplinariedad o integración. Rev Varona, No. 48-49, (43-49), ene-jun, La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico “Enrique José Varona”; 2009. p.46.
- ¹⁶MARTINEZ B N. El ejercicio integrador como vía para la formación de saberes interdisciplinarios en los estudiantes. Pasos para su conformación. Soporte digital. Las Tunas, Cuba: Instituto Superior Pedagógico “Pepito Tey”; 2007. p.7.
- ¹⁷ABAD G. (Apud Perera F). Proceso de enseñanza-aprendizaje. Interdisciplinariedad o integración. Rev Varona, No. 48-49, (43-49), ene-jun, La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico “Enrique José Varona”; 2009. p.46.
- ¹⁸MIRANDA T. La integración científica para la formación de educadores. Soporte digital. La Habana, Cuba: Centro de Desarrollo Científico Pedagógico de la Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”; 2011.

BIBLIOGRAFÍA

- ARENCIBIA V, HERNÁNDEZ R, LLIVINA M J, ET AL. Gestión de la Actividad de Ciencia e Innovación Tecnológica en la Educación Cubana. La Habana, Cuba: Sello Editor Educación Cubana; 2005.
- FARIÑAS G. Psicología, educación y sociedad. Un estudio sobre el desarrollo humano. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela; 2007.
- GARCÍA G, ADDINE F, PIÑÓN J, ET AL. La evaluación institucional en las universidades de ciencias pedagógicas. Experiencias y perspectivas. Curso No.16. Congreso Pedagogía 2011. La Habana, Cuba: Sello Editor Educación Cubana; 2011.
- MUÑOZ N. América Latina: Integración requiere nuevo impulso político. (s/f). <http://www.ipenespanol.net/terraviva/270902-2shtml>. (Consultado, enero 10 del 2012).
- PIÑÓN J, AÑORGA J. La universidad. Extensión e integración. Rev Varona, No. 29, jul-dic. La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico “Enrique José Varona”; 1999.
- PIÑÓN J. La integración científica: una necesidad del Siglo XXI. Revista Científico-Metodológica Realidad y Perspectiva Educativa. Convenio Cuba-Venezuela. Caracas, Venezuela. 2008.
- PIÑÓN J. Una aproximación a la concepción teórico-metodológica de la integración científica en la educación superior. Congreso Internacional Pedagogía 2011. La Habana, Cuba: Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”; 2011.
- PIÑÓN J, JUNCO M. La cooperación pedagógica para la implementación de la concepción teórico-metodológica de la integración científica. Reunión Científica. Soporte digital. La Habana, Cuba: Universidad de Ciencias Pedagógicas “Enrique José Varona”; 2011.
- REPILADO F. Algunas reflexiones respecto a la integración de contenidos. (s/f). <http://www.DRCFR RAMÍREZ, DEC LA INTEGRACIÓN. Intervox.nce.ufrj.br>. (Consultado, enero 15 del 2012).
- SOUZA J F. Sistematización: un instrumento pedagógico en los proyectos de desarrollo sustentable. (s/f). <http://www.alfoja.or.cs/sistem/instrumentpedag.doc> (Consultado, diciembre 8 del 2011).