



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



## PÉNDULO INVERTIDO USANDO CONTROLADOR POLOLU

Yuliana Cevallos Suárez, Israel España Mayalita, Pablo Enrique Ortega, Carlos Valdivieso Armendáriz

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador

ycevallo@espol.edu.ec, isedespa@espol.edu.ec

eportega@espol.edu.ec, cvaldiviv@espol.edu.ec

### Resumen

En el presente proyecto se realiza la construcción de un Péndulo Invertido usando un controlador Pololu y programación mediante el software Visual Studio4. El principal objetivo es el estudio y aplicación del modelo matemático de este sistema que puede ser utilizado para analizar sistemas más complejos, cuyos modelos son similares al del Péndulo Invertido.

La estructura para la dinámica del sistema se la construyó en acrílico. El movimiento se lo realiza mediante dos motores pequeños manejados con un controlador PID para lograr el equilibrio del sistema. El desarrollo de este proyecto es importante para demostrar la aplicación del control moderno en la identificación de modelos matemáticos ya que el Péndulo Invertido es un modelo clásico de control.

### Abstract

This project is about the construction of an Inverted Pendulum using a Pololu controller and using Visual Studio4 as programming software. The main objective is the study and application of the mathematical model in this system that can be used to analyze more complex systems, whose models are similar to the inverted pendulum.

The structure for the dynamic of this system was built in acrylic. The movement was performed by two small motors with a PID controller for the system's balance. The development of this project is an important application of modern control in the identification of mathematical models because the Inverted Pendulum is a classic control model.

# 1. Introducción

Nuestro proyecto tiene como objetivo la Construcción de un Péndulo Invertido [1], usando un controlador Pololu [5], poniendo en práctica los conceptos fundamentales del Control Automático Moderno. Uno de ellos, el controlador PID. Se usará el software AVR Studio4 [4], con lenguaje de programación C para el desarrollo de los algoritmos del proyecto.

Al finalizar el proyecto presentaremos conclusiones y propondremos recomendaciones que serán útiles para el desarrollo de futuros proyectos relacionados con el péndulo invertido.

## 2. Fundamento teórico

Describiremos cada uno de los elementos que son utilizados para el desarrollo de nuestro proyecto. La herramienta de Software es AVR Studio4 [4], y entre nuestras principales herramientas de Hardware tenemos; el controlador Pololu Baby Orangután B-328 [8], programador Pololu USB AVR [7], 2 Micro Metal Gearmotor 30:1 [9] y el Memsic Dual-Axis Accelerometer [10].

### 2.1 Herramientas de Software

#### 2.1.1 Avr Studio4

Es una herramienta de desarrollo para aplicaciones de Atmel AVR, la cual; nos permite realizar una programación C/C++ y utilizar código ensamblador. Entre sus características principales podemos destacar que posee un depurador que nos permite controlar la ejecución del programa y nos brinda apoyo durante la programación.

En la figura 1 a continuación, observamos las subdivisiones de la ventana al momento de programar, la parte remarcada en rojo nos muestra la sección donde se detalla si la programación contiene errores o no; y así, proceder a realizar las debidas correcciones, mientras que en la parte superior remarcada con negro observamos el despliegue del código que vamos escribiendo.

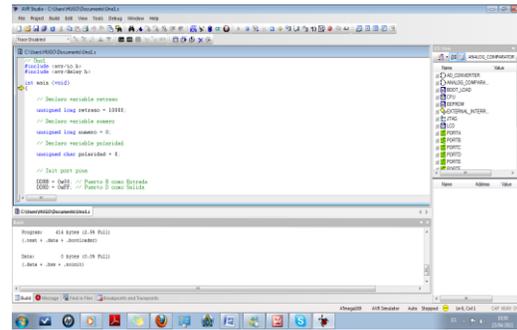


FIGURA 1. Ambiente de programación de AVR

STUDIO4

### 2.2 Herramientas de Hardware

#### 2.2.1 Baby Orangután B-328

Este es el controlador Pololu que usaremos para el desarrollo de nuestro Péndulo Invertido, el cual recibirá y enviará señales a todos los demás elementos utilizados. Por lo tanto, dicha herramienta de hardware es la más importante para el desarrollo de nuestro proyecto.

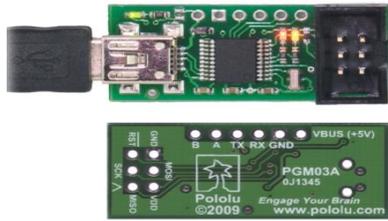
Es un controlador muy completo que además es una solución eficaz y eficiente para nosotros en cuanto a su tamaño como podemos apreciar en la figura 2. El ser compacto, es una característica de suma importancia para la estructura de nuestro proyecto ya que necesitamos que sea lo más liviana posible para que tenga una dinámica eficiente.



FIGURA 2. Vista general del Baby Orangután B-328

#### 2.2.2 Programador Pololu USB AVR

Este dispositivo nos permite realizar la programación del controlador a través de comunicación ISP. La energía que utiliza para funcionar proviene de un ordenador personal que es conectado a través de un mini cable USB, tal como se observa en la figura 3.



**FIGURA 3.** Programador Pololu USB

Además integra dos nuevas funciones, una de ellas es que funciona como Puerto Serial Virtual, para realizar prácticas de Comunicaciones Serial RS232, sin necesidad de conectar un cable adaptador Serial-USB.

### 2.2.3 Micro metal Gearmotor 30.1

Son pequeños motores que funcionan entre un rango de 3V a 9V, pero su voltaje ideal es de 6V, ya que los voltajes más bajos podrían no ser prácticos y expuestos a tensiones más elevadas podrían verse afectados negativamente en cuanto a su vida útil. Casi todos tienen la misma forma física, la diferencia entre ellos radica en las relaciones de transmisión; existen desde los 5:1 a 128: 1.



**FIGURA 4.** Forma física del Micro Metal Gearmotor 30:1

Cuando el motor trabaja con su voltaje ideal, es decir a 6V tenemos las siguientes especificaciones, en cuanto a su corriente bajo la condición de voltaje esta sería de 40mA y su velocidad en revoluciones por minuto 440.

### 2.2.4 Memsic Dual-Axis Accelerometer

El acelerómetro es un dispositivo que en general nos permite medir la aceleración, la cual sabemos que es una medida de la rapidez de los cambios de la velocidad. Al mismo tiempo conocemos que para llegar a tener dicha aceleración es necesario inicialmente obtener otras medidas como la distancia e inclinación, es por esto que tal dispositivo forma parte de nuestro proyecto. A continuación presentamos el módulo del acelerómetro en la figura 5.



**FIGURA 5.** Módulo del acelerómetro Memsic

Sus requisitos de alimentación son en cuanto a voltaje de 3,3 a 5V DC, La corriente de alimentación debe ser <5 mA. Su temperatura de operación se encuentra entre los 32°F a 158°F (0 a 70 ° C). Consta de una comunicación TTL/CMOS, compatible con PWM de 100Hz de la señal de salida con ciclo de trabajo proporcional a aceleración.

## 3. Diseño del proyecto

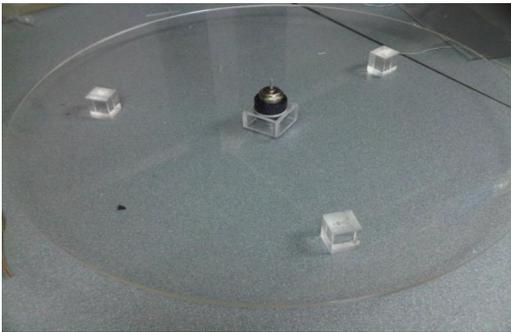
### 3.1 Diseño de la Estructura Física

Para generar el movimiento de la base del péndulo se usó dos motores Micro Metal Gearmotor 30:1, descrito anteriormente, los cuales fueron sujetos con un par de correíllas en los extremos opuestos al eje de giro como podemos visualizar en las figura 5



**FIGURA 5.** Motor y llanta

Para el soporte de giro se usa un eje de motor sobre el cual se asienta un extremo de la base de la estructura (Figura 6). Éste motor no tiene fuente de alimentación alguna ya que solamente cumple la función de pivote para nuestro movimiento rotacional. Su movimiento dependerá de las revoluciones que den los motores instalados en la parte delantera de la estructura.



**FIGURA 6.** Circunferencia base de la estructura y pivote

El péndulo está fijo a un pivote en la parte frontal de la estructura para que se genere el giro del mismo. El movimiento de toda la estructura antes descrita se realiza sobre una base o mesa circular que también fue hecha en material de acrílico lo que podemos claramente observar en la figura 7.



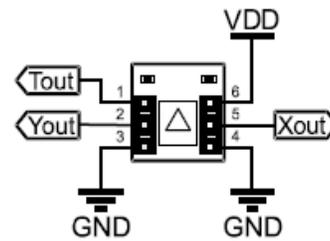
**FIGURA 7.** Estructura y base de acrílico

### 3.2 Análisis de Programación

La programación realizada en lenguaje C describe el funcionamiento de los motores según la necesidad de movimiento de la estructura para lograr el equilibrio en el péndulo. Por otra parte, describe también; por medio de la programación del acelerómetro el ángulo y distancia del movimiento del péndulo durante la búsqueda de dicho equilibrio.

## 4. Mediciones y Pruebas

Adquirimos los valores de los ángulos de inclinación que tomaba el Péndulo por medio de una lectura en un eje del elemento sensor que utilizamos que es el acelerómetro [10] que se lo conecta como se muestra en la figura 8.



**FIGURA 8.** Diagrama de conexión del acelerómetro

### 4.1 Respuestas de acelerómetro

En la figura 9 podemos observar la señal que nos daba el acelerómetro al realizar las pruebas, la cual; es una señal PWM que al estar en posición horizontal nos entrega una onda cuadrada con frecuencia de 100 Hertz y ancho de pulso de 5 ms. Dichas señales fueron observadas mediante el uso de un osciloscopio. Se pudo notar que al girar el acelerómetro en un sentido disminuía el ancho de pulso y al girarlo en el sentido opuesto este ancho de pulso aumentaba

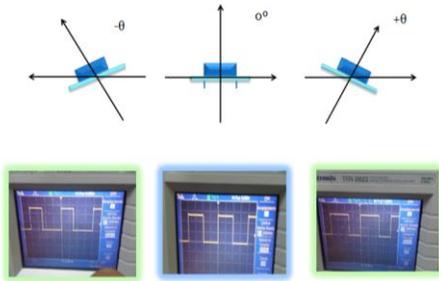


FIGURA 9. Señales de respuesta del acelerómetro

## 5. Conclusiones

Durante la realización de este trabajo aprendimos que para seleccionar los dispositivos adecuados para la realización de un proyecto debemos tener muy en cuenta las características físicas de cada uno de los elementos para que puedan cumplir con el trabajo que deben realizar.

Al momento de realizar la programación con el software que estemos utilizando, debemos tener muy en claro la forma de escribir las sentencias para de esa manera poder plantear el algoritmo que deseamos implementar en nuestro proyecto, y así poder aprovechar todas la herramientas disponibles.

Se concluye que es importante desarrollar la programación en base a al análisis previo de los principios de funcionamiento de cada elemento que participa en el proyecto porque de esta manera no habrá inconvenientes ni contratiempos que perjudiquen la realización del mismo.

## 6. Referencias

- [1] Pontificia Universidad Católica de Chile, <http://www.ceiafac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/ro/77.pdf>, FECHA DE CONSULTA 16-04-2011 (Péndulo Invertido)
- [2] Universidad Nacional Autónoma de México, <http://verona.fip.unam.mx/~lfridman/clases/modos/cap4.pdf>, FECHA DE CONSULTA 16-04-2011 (Péndulo de Mori)
- [3] Microchip información de péndulo, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00964A.pdf>, FECHA DE CONSULTA 16-04-2011 (Péndulo Invertido Rotacional)
- [4] Atmel catalogo de productos, [http://www.atmel.com/dyn/products/tools\\_card.asp?tool\\_id=2725](http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=2725) FECHA DE CONSULTA 23-04-2011 (avr studio4)
- [5] Pololu Electronics catálogo de productos, <http://www.pololu.com/catalog/product/1220> FECHA DE CONSULTA 23-04-2011 (Controlador 328)
- [6] Pololu Electronics catálogo de productos, <http://www.pololu.com/catalog/product/1300> FECHA DE CONSULTA 23-04-2011 (Programador)
- [7] Pololu Electronics catálogo de productos, <http://www.pololu.com/catalog/product/1300> FECHA DE CONSULTA 23-04-2011 (Pololu Programmer)
- [8] Atmel catálogo de productos en línea, [http://www.atmel.com/dyn/products/product\\_card.asp?part\\_id=4198](http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=4198) FECHA DE CONSULTA 23-04-2011 (ATmega 328P)
- [9] Pololu Electronics catálogo de productos, <http://www.pololu.com/catalog/category/60> FECHA DE CONSULTA 23-04-2011 (Motor)
- [10] Parallax, información de kit acelerómetro, <http://www.parallax.com/dl/docs/prod/acc/memsickit.pdf> FECHA DE CONSULTA 27-04-2011 (Acelerómetro)