

**EFFECTO DEL CONTENIDO ARMONICO DE LA TRAYECTORIA DE
REFERENCIA EN EL CONSUMO DE ENERGÍA DEL SERVOMOTOR
DYNAMIXEL AX-18A**



**SAÚL EDUARDO RUIZ SARZOSA
DAVID ALEJANDRO MUÑOZ MUÑOZ**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán
2014**

**EFFECTO DEL CONTENIDO ARMONICO DE LA TRAYECTORIA DE
REFERENCIA EN EL CONSUMO DE ENERGÍA DEL SERVOMOTOR
DYNAMIXEL AX-18A**

**SAÚL EDUARDO RUIZ SARZOSA
DAVID ALEJANDRO MUÑOZ MUÑOZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al
Título de Ingeniero en Automática Industrial**

**Director:
PhD. Carlos Felipe Rengifo Rodas**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán
2014**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, diciembre de 2014

DEDICATORIA

David Alejandro Muñoz

A DIOS, el dador de mi felicidad, en quien están mis deseos, anhelos, sueños e ilusiones de mi vida. Por hacerme tan privilegiado y afortunado, como solo Él lo podría hacer para mí.

A mis padres, quienes con su infinito amor hacia mí, inspiran cada logro de mi vida. Por su incansable esfuerzo y entrega, y los mejores deseos para mí.

A mí, por la satisfacción de saber, que alcanzo con esmero y perseverancia cada logro en mi vida.

Saúl Eduardo Ruíz

A DIOS, por bendecirme con el don de la vida y brindarme buena salud tanto física como espiritual.

A mis padres, por su amor, esfuerzo y dedicación incondicional, durante mi formación tanto personal como profesional.

A mí, porque es un escalón más satisfactoriamente alcanzado en mi vida y me siento orgulloso del esfuerzo y dedicación con los que saqué adelante esta carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la influencia directa o indirecta de muchas personas a las que agradecemos profundamente por estar presentes en las distintas etapas de su elaboración, así como en el resto de nuestras vidas.

Especiales agradecimientos al Doctor Carlos Felipe Rengifo por manifestarnos su interés en dirigir este trabajo de grado, por su confianza, colaboración y supervisión en el proceso de realización del proyecto, por su vocación y compromiso para la excelencia.

A todos los docentes de la Universidad del Cauca. A quienes trabajaron junto a nosotros hombro a hombro durante este ciclo poniendo lo mejor por el bien de nuestra formación profesional. A nuestros seres queridos quienes brindaron su cariño, tiempo, dedicación y los mejores momentos durante esta etapa como estudiantes universitarios.

RESUMEN

A través del presente proyecto se desea analizar el efecto del contenido armónico [1] de la trayectoria de referencia en el consumo de energía de un servomotor, para evaluar la posibilidad de optimización en el sistema mecánico a través de la implementación del tratamiento matemático [2], que se enfatiza en realizar la aproximación de una señal sinusoidal a una señal polinomial que posee diferente contenido armónico, ya que actualmente por ejemplo en robótica, solo se utiliza la trayectoria sinusoidal directamente a seguir por el sistema, lo que provoca pérdidas energéticas adicionales no previstas.

Para realizar la respectiva prueba experimental se dispone de un servomotor Dynamixel AX-18A, el cual generará la fuerza rotacional para desplazar un péndulo simple, emulando un comportamiento de trayectorias dado por el usuario final. Para la adquisición de datos, tratamiento y posterior análisis de resultados se utilizará el kit de desarrollo de software del servomotor, mediante el cual se generarán gráficas demostrativas del estado de consumo actual del sistema integrado, presentadas en una interfaz soportada por la herramienta matemática MATLAB®, para determinar el grado de optimización antes y después de la intervención.

Para garantizar resultados afines a lo esperado, se manejan dos variantes. La primera está basada en utilizar los valores entregados por la carga del servomotor en función del torque, para el cual se analizará la energía mecánica. La otra variante consta del análisis de la corriente eléctrica consumida por el servomotor. Para esto se requiere la implementación de un sensor de corriente.

Finalmente, con los datos obtenidos se dispondrá a realizar un análisis estadístico, donde se comprobará si el servomotor cuenta con las características necesarias para que la teoría sobre el contenido armónico aplique en este sistema mecánico.

ABSTRACT

Across this project is desired to analyze the effect of the harmonic content [1] of the reference trajectory in the power consumption of a servomotor, to evaluate the possibility of optimizing the mechanical system through of the implementation of mathematical treatment [2] which emphasizes to make the approximation of a sinusoidal signal to a polynomial signal having different harmonic content, actually for example in robotics, it only uses the sinusoidal trajectory directly to follow for the system, which causes additional energy losses not covered.

To make the respective experimental test is provided of a servomotor Dynamixel AX-18A, which will generate the rotational force to displace a single pendulum trajectory emulating a behavior given by the end user. For data acquisition, treatment and subsequent analysis of results will be used the software development kit of the servomotor, with which it will be generated graphic demonstration of the state of current consumption of the integrated system, presented in a supported interface by mathematical tool MATLAB, to determine the degree of optimization before and after intervention.

To ensure related results, two variants are handled. The first is based on using the values provided by the load of servomotor based on the torque which mechanical energy is analyzed. The other alternative consists of analyzing the electric current consumed by the servomotor. For this one is required the implementation of a current sensor.

Finally, with the data is provided to perform a statistical analysis, which will check if the servomotor has the characteristics necessary for than the theory about the harmonic content apply on this mechanical system.

CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	16
1. SISTEMA MECÁNICO (PÉNDULO SIMPLE) HARDWARE Y SOFTWARE... 18	
1.1 INTRODUCCIÓN	18
1.2 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA PLATAFORMA PENDULAR... 23	
1.2.1 Servomotor Dynamixel AX-18A..... 25	
1.2.1.1 Especificaciones servomotor Dynamixel AX-18A. 26	
1.2.1.2 Tabla de control de Dynamixel..... 27	
1.2.2 USB2Dynamixel..... 39	
1.2.3 Fuente de poder. 41	
1.2.3.1 Forma de conexión. 42	
1.2.4 Brazo/Péndulo. 42	
1.3 DYNAMIXEL SOFTWARE DEVELOPMENT KIT 44	
1.3.1 Interfaz de programación de aplicaciones..... 47	
2. DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL PROYECTO 49	
2.1 ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO SENSANDO EL TORQUE 52	
2.1.1 FUNCIÓN: ENVIAR TRAYECTORIA AL SERVO..... 52	
2.1.2 GENERAR TRAYECTORIAS PARA MOVIMIENTO TIPO SINUSOIDAL 57	
2.1.3 GENERAR TRAYECTORIAS PARA MOVIMIENTO TIPO POLINOMIAL 58	
2.1.4 COMPARACIÓN DE SEÑALES 60	
2.2 ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO SENSANDO LA CORRIENTE ELÉCTRICA 62	
2.2.1 SOFTWARE ADAPTADO PARA MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA..... 62	

2.2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA ARDUINO MEGA ADK	65
3. RESULTADOS	68
3.1 EN TÉRMINOS DE ENERGÍA MECÁNICA.....	69
3.2 EN TÉRMINOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	83
4. CONCLUSIONES.....	95
BIBLIOGRAFIA.....	96

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del hierro (Tomada de [21]).	23
Tabla 2. Tabla de control de Dynamixel (Tomada de [23]).	26
Tabla 3. Velocidad de transmisión (Tomada de [23]).	30
Tabla 4. Modos de operación (Tomada de [23]).	31
Tabla 5. Nivel de retorno de estados (Tomada de [23]).	32
Tabla 6. Cierre por Alarmas y tipos de error (Tomada de [23]).	33
Tabla 7. Pasos para flexibilidad de pendiente (Tomada de [23]).	34
Tabla 8. Energía mecánica, funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 70.	68
Tabla 9. Energía mecánica, funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 128.	71
Tabla 10. Energía mecánica, funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 254.	74
Tabla 11. Consumo promedio de energía. Margin = 2 / Slope = 70.	80
Tabla 12. Consumo promedio de energía. Margin = 2 / Slope = 128.	80
Tabla 13. Consumo promedio de energía. Margin = 2 / Slope = 254.	81
Tabla 14. Energía eléctrica, funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 128.	83

Tabla 15. Energía eléctrica, funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 254.....86

Tabla 16. Consumo promedio de energía eléctrica. Margin = 2 / Slope = 128.92

Tabla 17. Consumo promedio de energía eléctrica. Margin = 2 / Slope = 254.92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Representación ideal de un péndulo simple (Tomada de [19]).....	19
Figura 2. Péndulo de brazo rígido (Tomada de [20]).	19
Figura 3. Plano vista frontal. Brazo para péndulo.	20
Figura 4. Plano vista frontal. Orificios para pesas extra.	21
Figura 5. Desplazamiento angular (Tomada de [19]).	21
Figura 6. Plano vistas comunes. Base metálica para péndulo.....	22
Figura 7. Base Metálica soporte.	23
Figura 8. Plano vista atrás. Orificio para anclar el servomotor a la base.	24
Figura 9. Servomotor Dynamixel AX-18A.	25
Figura 10. Protocolo de comunicación de Dynamixel (Tomada de [22]).....	26
Figura 11. Programas comúnmente utilizados para enlazar el Dynamixel (Tomada de [22]).....	27
Figura 12. Margen de error (Tomada de [23]).....	35
Figura 13. Pendientes de llegada para 70, 128 y 256 respectivamente (Tomada de [23]).....	36
Figura 14. Esquema para interpretación de lectura (Tomada de [23]).....	38
Figura 15. USB2Dynamixel.....	39
Figura 16. Usos y partes del USB2Dynamixel (Tomada de [24]).....	40
Figura 17. Modo 3 pines (Tomada de [24]).....	40

Figura 18. Fuente para alimentación del servomotor.....	41
Figura 19. Esquema de conexión de la fuente al sistema (Tomada de [24]).	42
Figura 20. Brazo rígido.	43
Figura 21. Sistema mecánico pendular completo.	44
Figura 22. Vector de transmisión digital (Tomada de [25]).	45
Figura 23. Estados de error (Tomada de [25]).	46
Figura 24. Posición y Velocidad, Sinusoidal vs Polinomial.	49
Figura 25. Posición, Sinusoidal vs Polinomial grado 5.....	50
Figura 26. Velocidad, Sinusoidal vs Polinomial grado 5	50
Figura 27. Posición, Sinusoidal vs Polinomial grado 4.....	51
Figura 28. Velocidad, Sinusoidal vs Polinomial grado 4.	51
Figura 29. Tolerabilidad en el control de posición (Tomada de [23]).	54
Figura 30. Rango de posición (Tomada de [23]).....	55
Figura 31. Trayectoria Sinusoidal con dos armónicos.	68
Figura 32. Comparación de Torques, Función Seno Muestra 1 vs Muestra 37, $T = 10$, Margin = 2, Slope = 70.....	79
Figura 33. Comparación de Torques, Función Seno Muestra 14 vs Muestra 25, $T = 15$, Margin = 2, Slope = 128.....	80
Figura 34. Comparación de Torques, Función Seno Muestra 21 vs Muestra 42, $T = 20$, Margin = 2, Slope = 254.....	80
Figura 35. Comparación del consumo de Potencia eléctrica entre dos muestras de una misma señal (Polinomial $T = 60$).....	90
Figura 36. Promedio de energía en función del periodo. Margin 2, Slope 128.	90
Figura 37. Promedio de energía en función del periodo. Margin 2, Slope 254.	91

Figura 38. Histograma 50 ensayos, Señal Polinomial, $T = 20$, Margin = 2, Slope = 128.....	91
Figura 39. Histograma 50 ensayos, Señal Polinomial, $T = 30$, Margin = 2, Slope = 254.....	92
Figura 40. Lista de dispositivos del PC.....	99
Figura 41. Configuración de variables de entorno del sistema del PC.....	100
Figura 42. Configuración de paquetes de Matlab.....	101
Figura 43. Compilador Microsoft Visual C++ 2010 Professional.....	102
Figura 44. Esquema de la conexión en serie del sensor de corriente.....	103
Figura 45. Arduino Mega ADK (Tomada de [26]).....	104
Figura 46. Amplificador de Instrumentación Implementado.....	104
Figura 47. Esquemático del amplificador de instrumentación.....	105
Figura 48. Implementación de fuente dual (-9, 9) V.....	106
Figura 49. Implementación del sensor para la adquisición de datos vía Arduino.....	107

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Instalación y configuración inicial para la utilización del SDK de
Dynamixel99

Anexo B. Diseño e implementación de un sensor de corriente eléctrica para un
rango de trabajo conforme al consumo del servomotor103

INTRODUCCIÓN

Un problema clásico, pero más real que nunca en la tecnología moderna, es la optimización. Optimizar la transferencia de energía [3] en un sistema dinámico sigue siendo un gran reto para el que se han propuesto múltiples soluciones en cuanto a compensación de energía solo para sistemas eléctricos.

El aumento desmesurado del uso de aparatos eléctricos [4] no lineales, debido principalmente al auge de la electrónica de potencia en las últimas dos décadas, ha permitido el uso más eficiente de la energía eléctrica generando aumentos considerables en la productividad de los procesos industriales, lo cual en contrapeso ha provocado una situación problemática, ya que inyectan armónicos de alta frecuencia a la red eléctrica estableciendo un régimen no sinusoidal [5] donde el flujo bidireccional de energía [6] desde la fuente hacia la carga, distorsionan considerablemente la señal de referencia aplicada al sistema.

El término “Componente Armónico” [7], fue introducido para representar los múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo de un sistema, ya que mediante las series de Fourier se demostró que una señal periódica puede descomponerse como una suma de señales periódicas más simples para su análisis.

Teniendo en cuenta lo anterior, una señal de referencia puede ser constituida por diferentes formaciones de señales pero con diferente contenido armónico.

Para el caso de estudio, el análisis de los efectos del contenido armónico se centra en los sistemas mecánicos [8], en los cuales se generan amplificaciones de ganancia y comportamientos adversos como frenado, aumento de temperatura, desfases, entre otros. En la implementación de la señal de referencia [9, 10] existen diversidad de combinaciones para obtener el mismo resultado, sin embargo debido a que cada sistema físico [11] tiene su propia dinámica [12] por naturaleza, algunas frecuencias pueden excitarlo más que otras, Generalmente, estos aspectos no son contemplados a la hora de generar la trayectoria de referencia, como por ejemplo en sistemas robóticos [14, 15], donde lo importante es llegar a un destino requerido, sin importar la trayectoria intermedia sino su practicidad.

De esta manera, se busca analizar el efecto de este contenido armónico en la trayectoria de referencia del sistema mecánico, para evaluar el consumo de energía eléctrica [18] y validar que es conveniente tener en cuenta dicho contenido para optimizar la transferencia energética, sincronizando el flujo de energía mecánica con el flujo eléctrico [13] suministrado.

La inyección de potencia "no deseada", no se limita solamente a los sistemas sin disipación natural, generalmente, esta energía permite añadir "acciones derivativas" en el control. Por esta razón, el resultado es no solamente de interés en la teoría de circuitos, sino que también tiene aplicaciones en el control [16, 17].

1. SISTEMA MECÁNICO (PÉNDULO SIMPLE) HARDWARE Y SOFTWARE

1.1 INTRODUCCIÓN

Un péndulo simple [19] es un modelo idealizado que consiste en una masa puntual (a menudo, conocida como pesa o lenteja), suspendida de un cordón sin masa y no estirable. Si la masa se mueve a un lado de su posición de equilibrio (vertical), oscilará alrededor de dicha posición de manera armónica, donde la oscilación se rige por una amplitud y una frecuencia. Situaciones ordinarias, como una bola de demolición en el cable de una grúa o un niño en un columpio pueden modelarse como péndulos simples.

La trayectoria de la masa puntual no es una recta, sino el arco de un círculo de radio L igual a la longitud del cordón (figura 1) ideal para el análisis. Usamos como coordenada x la medida sobre el arco. Si el movimiento es armónico simple, la fuerza de restitución debe ser directamente proporcional a x , o bien porque ($x = L \theta$).

En la figura 1, se representan las fuerzas que actúan sobre la masa en términos de componentes tangencial y radial. En la ecuación (1), la fuerza de restitución F es la componente tangencial de la fuerza total:

$$F = -mg \sin \theta \quad (1)$$

Donde,

m : masa del cuerpo

g : gravedad

θ : tangencial de la fuerza total

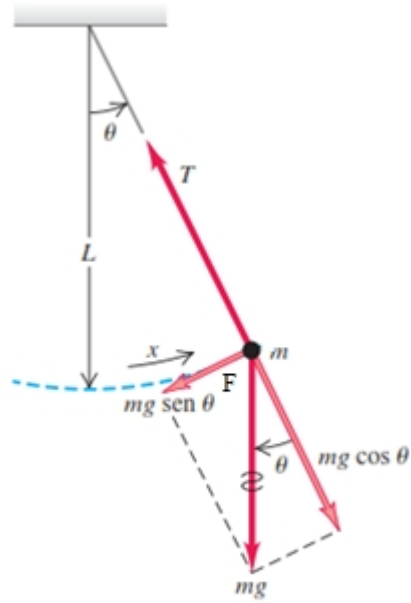


Figura 1. Representación ideal de un péndulo simple (Tomada de [19]).

El cordón o hilo blando se supone sin masa para representar el péndulo ideal. En contraste, para el caso de estudio es necesario reemplazarlo por un brazo sólido y rígido con una masa considerable como se representa en la figura 2, que interactúe con la fuerza del servomotor para que se genere la menor cantidad de vibración natural del material.



Figura 2. Péndulo de brazo rígido (Tomada de [20]).

Por otro lado, en la representación ideal del péndulo, la masa con la que se experimenta se modela como una masa puntual. Para el caso de estudio se diseñó un brazo (figura 3) con dos bases una menor y otra mayor, en la que se perforaron 6 orificios rectangulares (figura 4) con posiciones específicas y convenientes para insertar unas pesas extra, de tal manera que su base mayor (la de abajo) gane peso y funcione semejante a la masa puntual del modelo ideal.

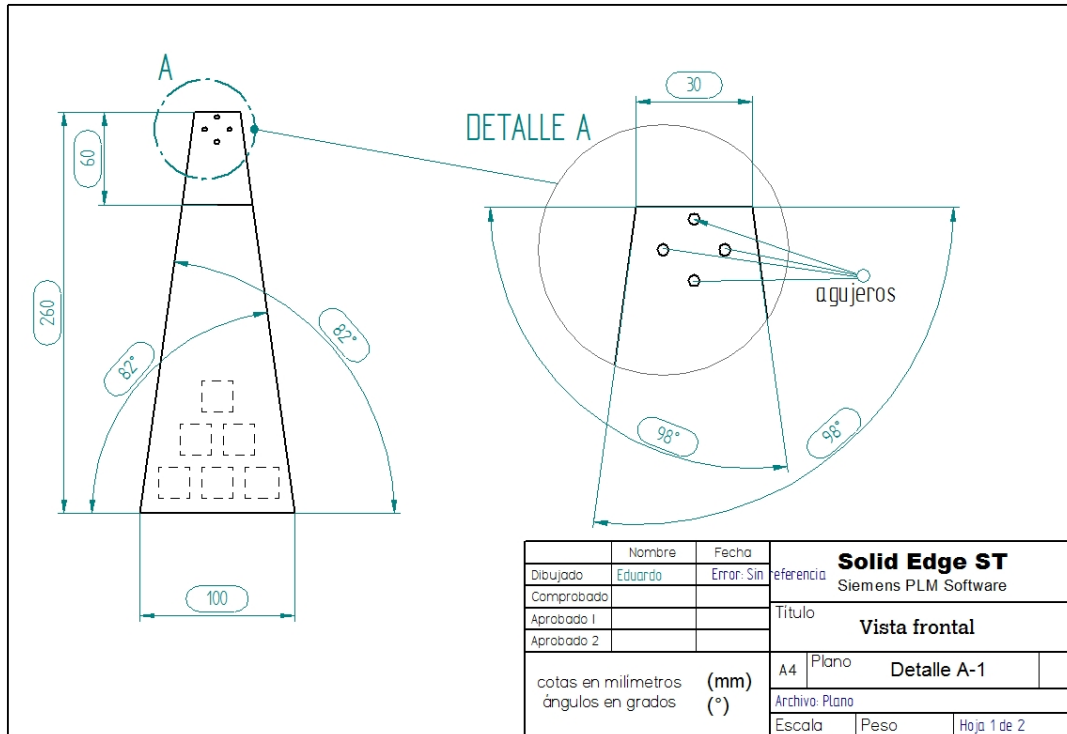


Figura 3. Plano vista frontal. Brazo para péndulo.

La fuerza de restitución se debe a la gravedad; la tensión T sólo actúa para hacer que la masa puntual describa un arco. La fuerza de restitución es proporcional no a θ sino a $\sin \theta$, así que el movimiento no es armónico simple. Sin embargo, si el ángulo θ es pequeño, $\sin \theta$ es casi igual a θ en radianes (figura 5). Por ejemplo, si $\theta = 0.1$ rad (unos 6°), $\sin \theta = 0.0998$, una diferencia de sólo 0.2%. Con esta aproximación, la ecuación (1) se convierte en

$$F_\theta = -mg\theta = -mg\frac{x}{L} \quad (2)$$

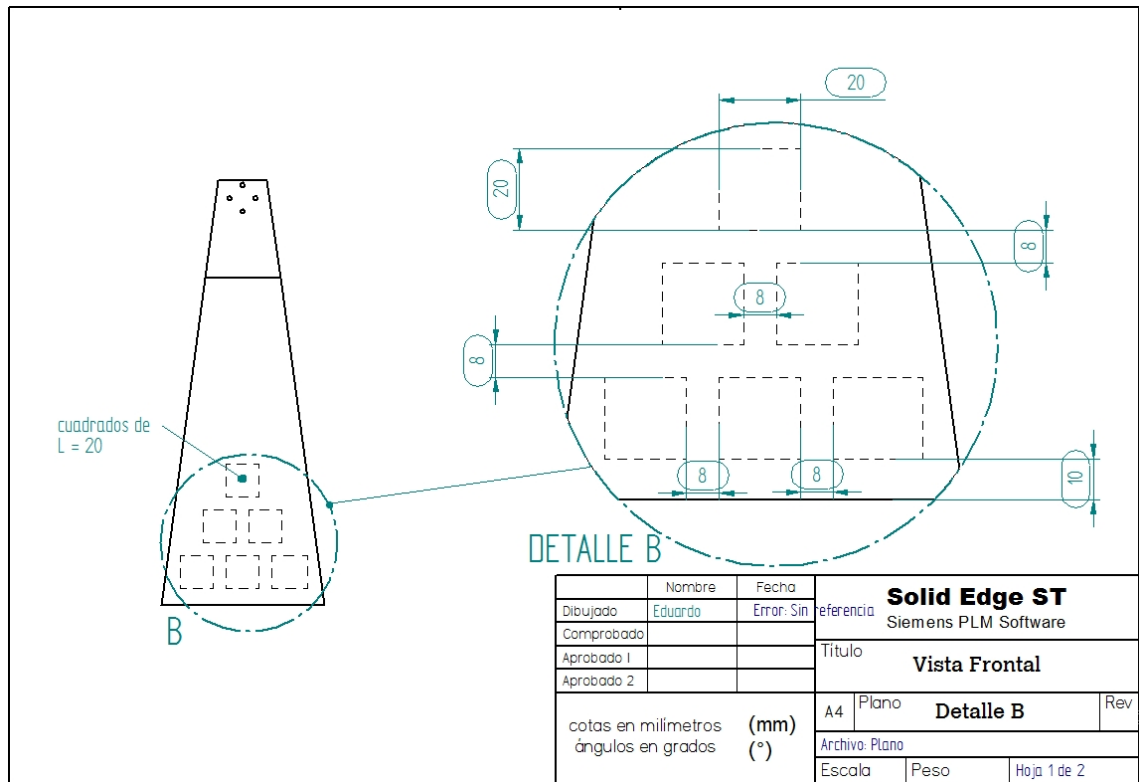


Figura 4. Plano vista frontal. Orificios para pesas extra.

Si el desplazamiento angular es pequeño, la fuerza de restitución para un péndulo simple es $F = -mg \sin \theta$, aproximadamente igual a $F = -mg \theta$; es decir, es aproximadamente proporcional al desplazamiento; por lo tanto, para ángulos pequeños, las oscilaciones son armónicas simples.

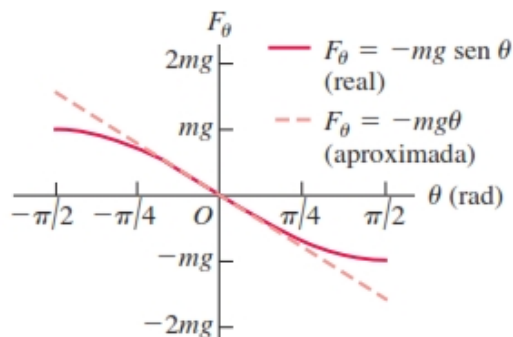


Figura 5. Desplazamiento angular (Tomada de [19]).

De esta manera, para la ejecución de la experimentación se utiliza el concepto general de péndulo simple para implementarlo en una plataforma metálica (Figura 6), donde el movimiento rotacional lo genera un servomotor el cual se encarga de seguir la referencia, cuya trayectoria va a estar representada por señales con diferente contenido armónico, de tal manera que se pueda analizar el consumo energético.

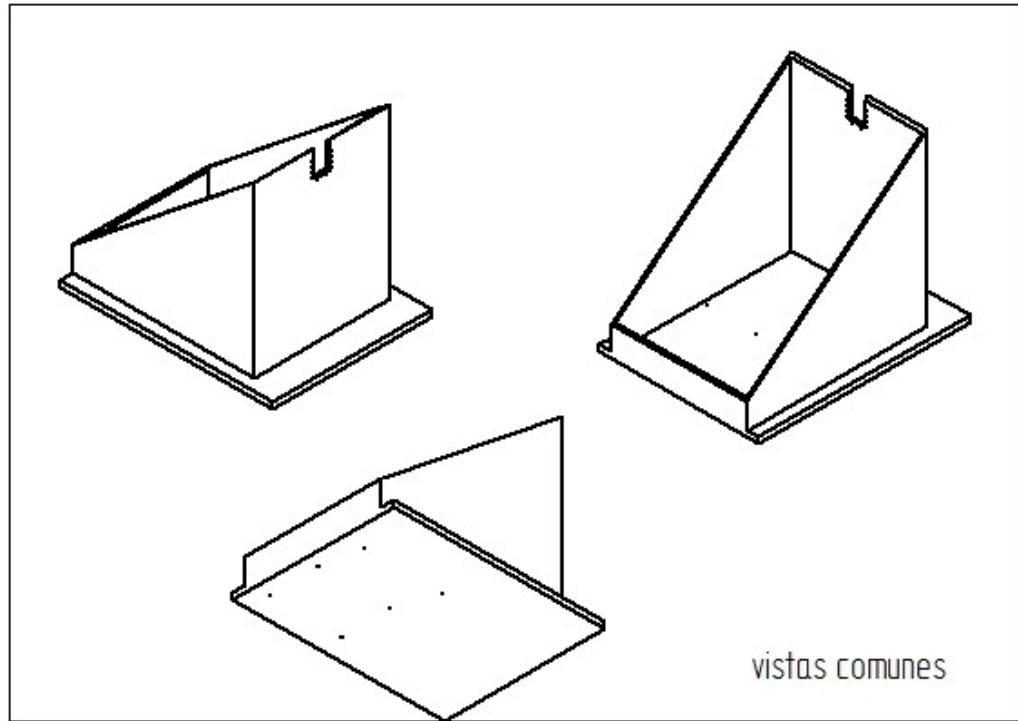


Figura 6. Plano vistas comunes. Base metálica para péndulo.

1.2 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA PLATAFORMA PENDULAR

El sistema mecánico pendular se soporta en una base metálica, como se muestra en la Figura 7.

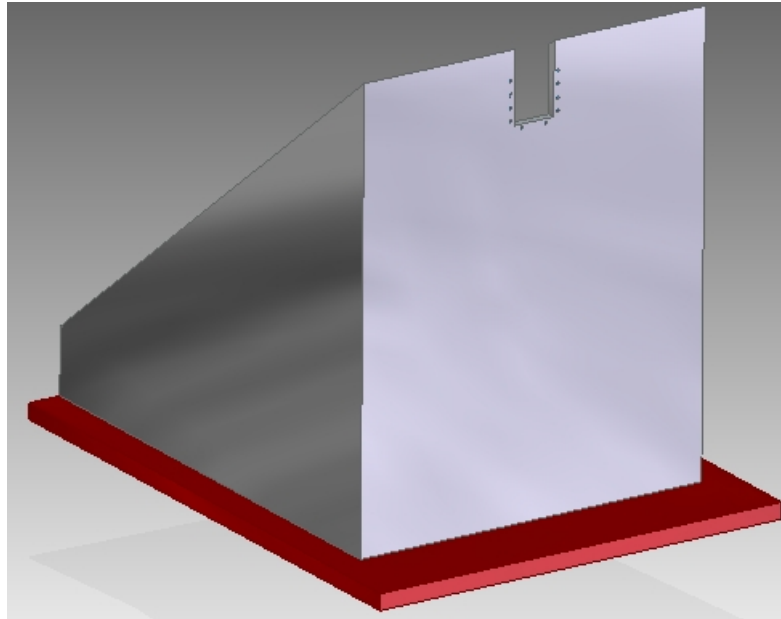


Figura 7. Base Metálica soporte.

Masa base: 9. 57 Kg

Material: Hierro

Estabilidad: El rígido material (Fe) sumado a la considerable masa intrínseca que posee (Véase tabla 1), brindan la estabilidad necesaria para filtrar ruido ante vibraciones por movimiento.

Disipador de temperatura: El hierro es un excelente disipador y conductor de temperatura, otra razón por la cual se decidió escoger este material, ya que al sujetar al servomotor (figura 8), se encarga de reducir la temperatura normal de trabajo de este, lo que hace que se pueda experimentar con él por un tiempo más prolongado.

Hierro	
Símbolo químico	Fe
Número atómico	26
Grupo	8
Periodo	4
Aspecto	metálico brillante con un tono grisáceo
Bloque	d
Densidad	7874 kg/m ³
Masa atómica	55,845 u
Radio medio	140 pm
Radio atómico	156
Radio covalente	126 pm
Configuración electrónica	[Ar]3d ⁶ 4s ²
Electrones por capa	2, 8, 14, 2
Estados de oxidación	2, 3
Óxido	anfótero
Estructura cristalina	cúbica centrada en el cuerpo
Estado	sólido
Punto de fusión	1808 K
Punto de ebullición	3023 K
Calor de fusión	13,8 kJ/mol
Presión de vapor	7,05 Pa a 1808 K
Electronegatividad	1,83
Calor específico	440 J/(K·kg)
Conductividad eléctrica	9,93·10 ⁶ S/m
Conductividad térmica	80,2 W/(K·m)

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del hierro (Tomada de [21]).

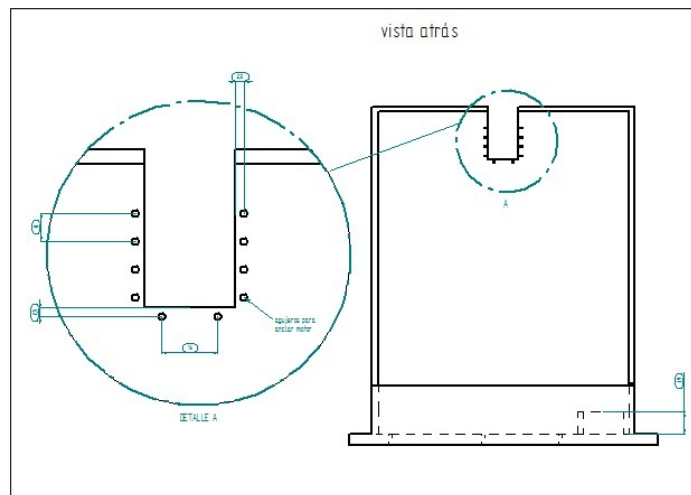


Figura 8. Plano vista atrás. Orificio para anclar el servomotor a la base.

1.2.1 Servomotor Dynamixel AX-18A.

Es la parte esencial del sistema mecánico ya que genera el movimiento rotacional que hace oscilar controladamente el brazo o péndulo.

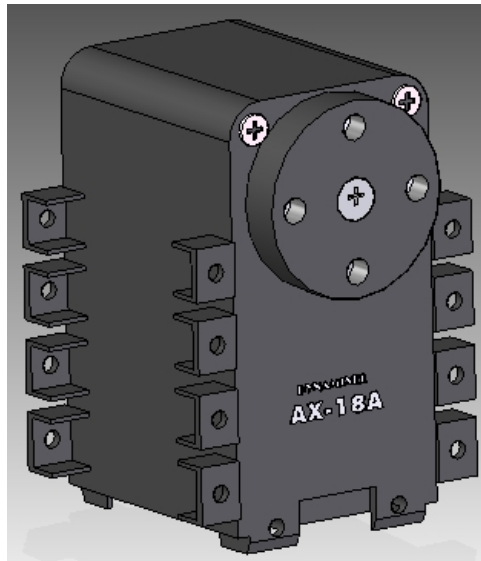


Figura 9. Servomotor Dynamixel AX-18A.

Los servomotores Dynamixel AX - 18A son actuadores inteligentes especialmente diseñados para aplicaciones de robótica. Cada servo contiene un microcontrolador que efectúa las operaciones de control.

Este dispositivo permite generar diversos tipos de movimientos, ya que tiene la posibilidad de ajustar una variedad de parámetros de operación, así como también mediante una amplia realimentación, permite visualizar todo el proceso desde la comunicación si es correcta, hasta la comprobación de los datos en la ejecución.

Dynamixel es un actuador de alto rendimiento controlado mediante paquetes digitales enlazados a un protocolo de comunicación, véase la figura 10.

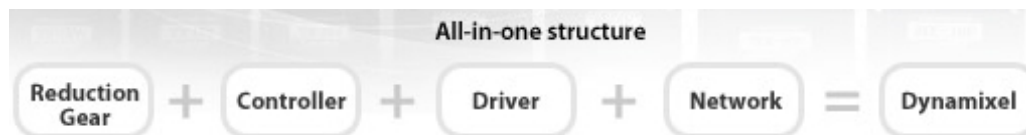


Figura 10. Protocolo de comunicación de Dynamixel (Tomada de [22]).

1.2.1.1 Especificaciones servomotor Dynamixel AX-18A.

Voltaje de Operación: 9 – 12 V (Recomendado 11.1 V)

Corriente de Arranque: 2,2 A

Torque Maximo: 1.8 N.m (12.0 V, 2.2 A)

Rango posible Par de Arranque: 1,8 - 12 V

Relación Sensor de Posición: Tipo potenciómetro 300° -> 1024

Velocidad sin Carga: 97 RPM (at 12 V)

Temperatura de operación: -5°C ~ +75°C

Protocolo de Comunicación: RS-232, RS-485, Half duplex Comunicación Asíncrona Serial (8bit, 1stop, No Paridad)

Velocidad de Comunicación: 7343 bps ~ 1 Mbps

Ángulo máximo generado: 0 - 300°

Resolución: 0.29°

Relación de transmisión: 254:1

Variables que sensa: Velocidad, posición, carga, voltaje (tensión de corriente suministrada), temperatura.



Figura 11. Programas comúnmente utilizados para enlazar el Dynamixel (Tomada de [22]).

1.2.1.2 Tabla de control de Dynamixel.

La tabla de control de Dynamixel consta de datos sobre el estado actual y el funcionamiento de lo que está dentro de Dynamixel. El usuario puede controlar Dynamixel cambiando los datos de la tabla de control a través de una serie de instrucciones que proveen todas las posibilidades de control y medición de diversas variables.

Area	Dirección (Hexadecimal)	Nombre	Descripción	Lect./Escrit.	Valor inicial (Hexadecimal)
EEPROM	0 (0X00)	Model Number(L)	Lowest byte of model number	R	18(0X12)
	1 (0X01)	Model Number(H)	Highest byte of model number	R	0 (0X00)
	2 (0X02)	Version of Firmware	Information on the version of firmware	R	-
	3 (0X03)	ID	ID of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	4 (0X04)	Baud Rate	Baud Rate of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	5 (0X05)	Return Delay Time	Delay between transmission and status of package	RW	250 (0XFA)
	6 (0X06)	CW Angle Limit(L)	Lowest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	7 (0X07)	CW Angle Limit(H)	Highest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	8 (0X08)	CCW Angle Limit(L)	Lowest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	255 (0XFF)
	9 (0X09)	CCW Angle Limit(H)	Highest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	3 (0X03)
11 (0X0B)	the Highest Limit Temperature	Internal Limit Temperature	RW	75 (0X46)	

Tabla 2. Tabla de control de Dynamixel (Tomada de [23]).

Area	Dirección (Hexadecimal)	Nombre	Descripción	Lect./Escrit.	Valor inicial (Hexadecimal)
	12 (0X0C)	the Lowest Limit Voltage	Lowest Limit Voltage	RW	60 (0X3C)
	13 (0X0D)	the Highest Limit Voltage	Highest Limit Voltage	RW	140 (0X8C)
	14 (0X0E)	Max Torque(L)	Lowest byte of Max. Torque	RW	215 (0XD7)
	15 (0X0F)	Max Torque(H)	Highest byte of Max. Torque	RW	3 (0X03)
	16 (0X10)	Status Return Level	Status Return Level	RW	2 (0X02)
	17 (0X11)	Alarm LED	LED for Alarm	RW	36(0x24)
	18 (0X12)	Alarm Shutdown	Shutdown for Alarm	RW	36(0x24)
R A M	24 (0X18)	Torque Enable	Torque On/Off	RW	0 (0x00)
	25 (0X19)	LED	LED On/Off	RW	0 (0x00)
	26 (0X1A)	CW Compliance Margin	CW Compliance margin	RW	1 (0x01)
	27 (0X1B)	CCW Compliance Margin	CCW Compliance margin	RW	1 (0x01)
	28 (0X1C)	CW Compliance Slope	CW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	29 (0X1D)	CCW Compliance Slope	CCW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	30 (0X1E)	Goal Position(L)	Lowest byte of Goal Position	RW	-
	31 (0X1F)	Goal Position(H)	Highest byte of Goal Position	RW	-
	32 (0X20)	Moving Speed(L)	Lowest byte of Moving Speed	RW	-
	33 (0X21)	Moving Speed(H)	Highest byte of Moving Speed	RW	-
	34 (0X22)	Torque Limit(L)	Lowest byte of Torque Limit	RW	ADD14
	35 (0X23)	Torque Limit(H)	Highest byte of Torque Limit	RW	ADD15
	36 (0X24)	Present Position(L)	Lowest byte of Current Position	R	-
	37 (0X25)	Present Position(H)	Highest byte of Current Position	R	-
	38 (0X26)	Present Speed(L)	Lowest byte of Current Speed	R	-
	39 (0X27)	Present Speed(H)	Highest byte of Current Speed	R	-
	40 (0X28)	Present Load(L)	Lowest byte of Current Load	R	-
	41 (0X29)	Present Load(H)	Highest byte of Current Load	R	-
	42 (0X2A)	Present Voltage	Current Voltage	R	-
	43 (0X2B)	Present Temperature	Current Temperature	R	-
	44 (0X2C)	Registered	Means if Instruction is registered	R	0 (0x00)
	46 (0X2E)	Moving	Means if there is any movement	R	0 (0x00)
47 (0X2F)	Lock	Locking EEPROM	RW	0 (0x00)	
48 (0X30)	Punch(L)	Lowest byte of Punch	RW	32 (0X20)	
49 (0X31)	Punch(H)	Highest byte of Punch	RW	0 (0x00)	

Tabla 2. (Continuación)

A continuación, se hace referencia de cada una de las características de la tabla de control, que son de mayor importancia para tener en cuenta en el proyecto.

- EEPROM y RAM

Los datos en el área RAM se restablecen al valor inicial una vez se enciende el dispositivo, en tanto que los datos en el área de EEPROM se mantienen una vez que el valor se establece incluso sin alimentación de poder.

- Dirección

La dirección representa la localización de los datos. Para leer o escribir datos en la tabla de control, el usuario debe asignar la dirección correcta en el paquete de instrucciones.

- Acceso

Dynamixel tiene dos tipos de datos: datos de sólo lectura, que se utilizan principalmente para la detección, y datos de lectura y escritura, que se utilizan para la adecuación de los requerimientos.

- Valor inicial

Para el caso de los datos en el área EEPROM, los valores iniciales son los valores predeterminados de fábrica. Para el caso de los datos en el área de memoria RAM, los valores iniciales aplican cuando hay alimentación de poder.

- Byte más alto/Byte más bajo

En la tabla de control, algunos datos comparten el mismo nombre, pero están ligados con (L) o (H) al final de cada nombre para distinguir la dirección. Estos datos requieren de 16 bits, pero se dividen en 8 bits para cada uno de las direcciones (bajos) y (altos). Estas dos direcciones deben ser escritas como un paquete de instrucciones al mismo tiempo.

- ID

Es un número único de identificación para cada servomotor, con el fin de direccionar la transmisión o recepción de datos en el bus de comunicación.

El rango de 0 a 252 (0xFC) se puede utilizar, y el 254 (0xFE) se utiliza como el ID de transmisión.

Si el ID de transmisión se utiliza para transmitir paquetes de instrucciones, se pueden enviar instrucciones a todos los Dynamixel que estén conectados.

- Velocidad de transmisión (0x04)

Representa la velocidad de comunicación. El rango de 0 a 254 (0xFE) se puede utilizar para ello, véase la tabla 3.

Esta velocidad se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad (BPS)} = 2.000.000 / (\text{Data} + 1)$$

Data	Set BPS	Target BPS	Tolerance
1	1000000.0	1000000.0	0.000 %
3	500000.0	500000.0	0.000 %
4	400000.0	400000.0	0.000 %
7	250000.0	250000.0	0.000 %
9	200000.0	200000.0	0.000 %
16	117647.1	115200.0	-2.124 %
34	57142.9	57600.0	0.794 %
103	19230.8	19200.0	-0.160 %
207	9615.4	9600.0	-0.160 %

Tabla 3. Velocidad de transmisión (Tomada de [23]).

Para el caso de estudio se escoge la tasa de velocidad de transferencia más alta que es de 1 MBPS, ya que se necesitan sensor datos en tiempo real.

- Tiempo de retardo

El valor leído en la dirección 0x05 es un número entero proporcional al tiempo transcurrido entre el envío y el retorno de un paquete de datos. La constante de proporcionalidad es de 2 us. Así por ejemplo, si el valor leído es 10, el retardo habrá sido de 20 us. El valor por defecto es 250, es decir, un retardo de 500 us.

- Modo de operación y ángulo límite CW/CCW

El ángulo límite permite restringir el movimiento.

El rango y la unidad de valor es el mismo que en la posición meta (Dirección 30, 31, véase Tabla 2).

- Ángulo Límite en CW: (Clock Wise: a favor de las manecillas), es el valor mínimo que puede tomar la posición (Dirección 30, 31, véase Tabla 2)
- Ángulo Límite en CCW: (Counter Clock Wise: en contra de las manecillas), es el valor máximo que puede tomar la posición (Dirección 30, 31, véase Tabla 2)

Los dos modos de operación se pueden ajustar de acuerdo con el valor de CW y CCW, como lo indica la tabla 4.

Operation Type	CW / CCW
Wheel Mode	both are 0
Joint Mode	neither at 0
Joint Mode	both at not 4095

Tabla 4. Modos de operación (Tomada de [23]).

El modo timón (Wheel Mode), se puede utilizar para robots de operación de tipo rueda cuando los motores de los robots necesiten girar indefinidamente, por lo que se debe ubicar los dos valores (CW y CCW) en cero.

El modo de articulación (Joint Mode), puede ser usado para múltiples articulaciones de robots ya que algunos de estos pueden ser controlados con ángulos específicos, por lo tanto, ninguno de los dos valores (CW y CCW) deben estar en cero.

Para el caso particular de estudio se escoge el modo articulación, ya que es necesario controlar el ángulo de rotación del servomotor con valores exactos de amplitud, para poder simular el comportamiento del péndulo, además este modo permite probar la capacidad límite del servo en términos de la robustez del controlador.

La experimentación es realizada con valores de 45° de amplitud en la dirección en contra de las manecillas del reloj, y -45° de amplitud en la dirección a favor de las manecillas.

- Torque máximo (0x0E, 0x0F)

Es el valor de par motor de salida máximo. Se puede utilizar en el rango de 0 a 1023 (0x3FF) y la unidad es de aproximadamente 0.1%.

Por ejemplo, si el dato es de 1023 (0x3FF), significa que el servomotor utilizará el 100% del par máximo que puede producir, de esta manera, si se toma el dato 512 (0x200), significa que usará el 50% del par máximo. Cuando se alimenta el sistema, el par límite (Direcciones 34 y 35, véase Tabla 2) utiliza unos determinados valores (ADD 14, ADD 15) como iniciales, véase la tabla 2.

Para el caso considerado, se deja el torque en modo libre y el servomotor se encarga de asignar el necesario para su operación, teniendo en cuenta la frecuencia y el número de muestras que se tomen, de esta manera se hace efectiva la medición de torques para determinar la energía promedio consumida.

- Nivel de retorno de estado (0X10)

El nivel de retorno de estado determina la forma de devolución del paquete de estados. Hay tres formas, véase la tabla 5.

Value	Return of Status Packet
0	No return against all commands (Except PING Command)
1	Return only for the READ command
2	Return for all commands

Tabla 5. Nivel de retorno de estados (Tomada de [23]).

El valor 2 se utiliza en este caso, ya que se requiere leer todas las variables correspondientes al paquete de estados.

- Alarmas para detección de causas de fallo y led indicador (0x11, 0x12)

El servomotor Dynamixel puede protegerse mediante la detección de errores que se produzcan durante la operación.

Estos errores se pueden definir según la tabla 6.

Bit	Name	Contents
Bit 7	0	-
Bit 6	Instruction Error	Cuando la instrucción indefinida se transmite o el comando de acción se entrega sin el comando reg_write
Bit 5	Overload Error	Cuando la corriente de carga no puede ser controlada con el conjunto de par máximo
Bit 4	Checksum Error	Cuando la suma de comprobación del paquete de instrucciones transmitido no es válido
Bit 3	Range Error	Cuando la orden va más allá del rango establecido
Bit 2	OverHeating Error	Cuando la temperatura interna está fuera del rango de temperatura de funcionamiento establecido en la tabla de control
Bit 1	Angle Limit Error	Cuando la Posición Meta toma un valor que no está entre el límite de ángulo CW y CCW
Bit 0	Input Voltage Error	Cuando el voltaje aplicado está fuera del rango de operación, según la configuración en la tabla

Tabla 6. Cierre por Alarmas y tipos de error (Tomada de [23]).

Si se producen errores, en el caso de la alarma LED, este parpadea; para el caso de cierre por alarma, la salida del motor queda al 0% por lo que el valor de par límite (Dirección 34, 35, véase Tabla 2) se hace 0.

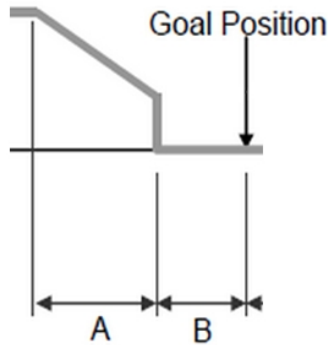
- Desempeño

El desempeño se refiere al ajuste paramétrico de la flexibilidad en el control del motor.

- Margen de error (Compliance “Margin”)

Existe para cada sentido de CW/CCW y significa el error entre la posición meta y la posición actual.

El rango de valores va de 0 a 255, y la unidad es la misma que la de la posición deseada. (Dirección 30,31, véase Tabla 2, Figura 12). Cuanto mayor es el valor, más diferencia se produce.



B : CCW Compliance Margin(Address0x1B)

Figura 12. Margen de error (Tomada de [23]).

- Pendiente de llegada (“compliance slope”)

Existe para cada sentido de CW/CCW y establece el nivel de torque cerca a la posición meta.

También conocida como pendiente de desempeño se establece en 7 pasos. Cuanto mayor sea el valor, se obtiene mayor flexibilidad, véase la tabla 7.

Step	Data Value	Data Representative Value
1	0 (0x00) ~ 3(0x03)	2 (0x02)
2	4(0x04) ~ 7(0x07)	4 (0x04)
3	8(0x08)~15(0x0F)	8 (0x08)
4	16(0x10)~31(0x1F)	16 (0x10)
5	32(0x20)~63(0x3F)	32 (0x20)
6	64(0x40)~127(0x7F)	64 (0x40)
7	128(0x80)~254(0xFE)	128 (0x80)

Tabla 7. Pasos para flexibilidad de pendiente (Tomada de [23]).

En la figura 13, se realiza la interpretación gráfica de los valores de pendiente de llegada,

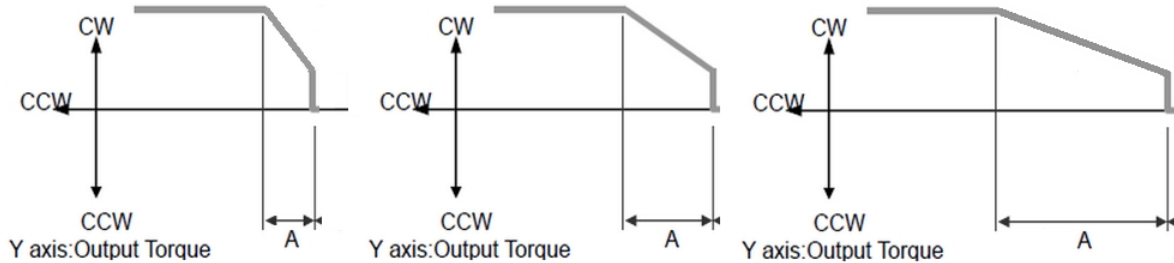


Figura 13. Pendientes de llegada para 70, 128 y 256 respectivamente (Tomada de [23]).

Este valor se escoge de acuerdo al nivel de exigencia que se requiera por trayectoria, teniendo en cuenta que por defecto viene dado en 32, o sea que se está aplicando el máximo torque para que la posición actual llegue a la posición deseada.

3

Hacer que la pendiente de llegada adquiera dicho valor es perjudicial para el actuador en casos donde no se requiere mayor esfuerzo, puesto que se le está aplicando el máximo torque para cada paso de la trayectoria. Por ende, se han estudiado adicionalmente los efectos de este parámetro que no es comúnmente tenido en cuenta.

- Velocidad de movimiento

Es la velocidad a la cual se desplaza hacia la posición meta. El rango y la unidad del valor pueden variar dependiendo del modo de operación.

- Modo articulación

El rango va de 0 ~ 1023 (0x3FF), y la unidad es de 0.111 rpm.

Si el valor se establece en 0, significa que la acción de desplazamiento se ejecuta sin control de velocidad, por lo tanto, el servomotor determina automáticamente la velocidad conveniente para realizar la acción.

Si se establece el valor de 1023, significa que el servomotor va a tomar la máxima velocidad que es de 114rpm.

Por ejemplo, si la velocidad se establece en 300, se refiere a 33,3 rpm.

Para el caso de la experimentación con el péndulo, se hace el cálculo de la velocidad mediante la derivada de la posición, para garantizar que la trayectoria sea visualmente suave cuando está próxima a sus puntos críticos, y fluida como la naturaleza del comportamiento de un péndulo.

- Modo timón

El rango va de 0 ~ 2047 (0X7FF), la unidad es de aproximadamente 0.1%.

Si se utiliza un valor en el rango de 0 ~ 1023, 0 es el valor inicial indicando que se encuentra detenido, y gira gradualmente en la dirección CCW a medida que se avanza dentro del rango. Si se utiliza un valor en el rango de 1024 ~ 2047, 1024 es el valor inicial indicando que se encuentra detenido, mientras gira en la dirección CW.

En el modo timón, sólo se controla la salida, no la velocidad. Por ejemplo, si se establece el valor en 512, significa que la salida se controla en un 50% de la potencia máxima.

- Torque límite

El rango de torque está dado de 0 a 1023 (0x3FF), y la unidad es de aproximadamente 0.1%. Por ejemplo, si se toma el valor de 512 significa que se utilizará sólo el 50% del torque.

Si la alimentación está conectada, el valor de torque máximo (Dirección 14, 15, véase Tabla 2) se utiliza como valor inicial.

- Posición actual

El rango de valor es de 0 ~ 1023 (0x3FF), y la unidad es 0.29 grados, véase figura 23.

- Carga presente

El rango del valor es de 0 ~ 2047, y la unidad es de aproximadamente 0.1%.
 Si el valor es 0 ~ 1023, significa que la carga aplicada fluye en la dirección CCW.
 Si el valor es 1024 ~ 2047, significa que la carga está en la dirección CW.

Es decir, el bit de dirección se convierte en el décimo bit para controlar la dirección, y 1024 es igual a 0, véase figura 12.

BIT	15~11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	0	Load Direction	Data (Load Ratio)									

Figura 14. Esquema para interpretación de lectura (Tomada de [23]).

Dirección de la carga (Load Dirección):

0, Carga en CCW.
 1, Carga en CW.

- Voltaje presente

Es la dimensión de la tensión actual suministrada.
 Este valor es mil veces más grande que la tensión real. Por ejemplo, cuando se suministran 10V, el valor en datos que arroja es 10000 (0x2710).

- Temperatura presente

Es la temperatura interna de Dynamixel en grados Centígrados.
 El valor en datos es idéntico a la temperatura real en grados Centígrados. Por ejemplo, si el valor en datos es 85 (0x55), la temperatura interna actual es de 85 °C.

1.2.2 USB2Dynamixel.

Este dispositivo (figura 13), es necesario para la conexión del puerto particular y específico de cada servo. El dispositivo USB2Dynamixel permite la conexión directa de la PC al bus Dynamixel.

Este módulo admite la conexión de diferentes series de Dynamixel, así como también la conexión opcional del ZIG2Serial que permite la comunicación a los servos vía inalámbrica.

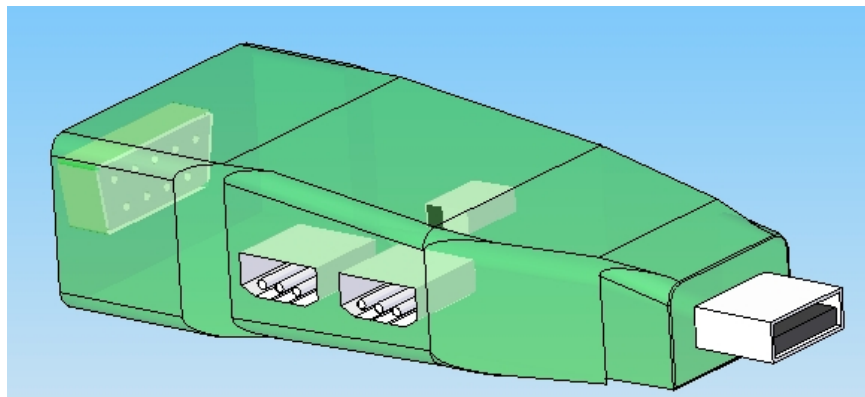


Figura 12. USB2Dynamixel

Por medio de éste se realiza la transferencia de los paquetes digitales desde y hacia el servomotor.

Ya que USB2Dynamixel es un dispositivo utilizado para operar el servomotor directamente desde el PC, se conecta al puerto USB, y cuenta con dos conectores (3P y 4P, véase figura 14), instalados de tal manera que varios servos puedan ser conectados al mismo tiempo.

USB2Dynamixel se puede conectar también mediante el puerto serial al PC.

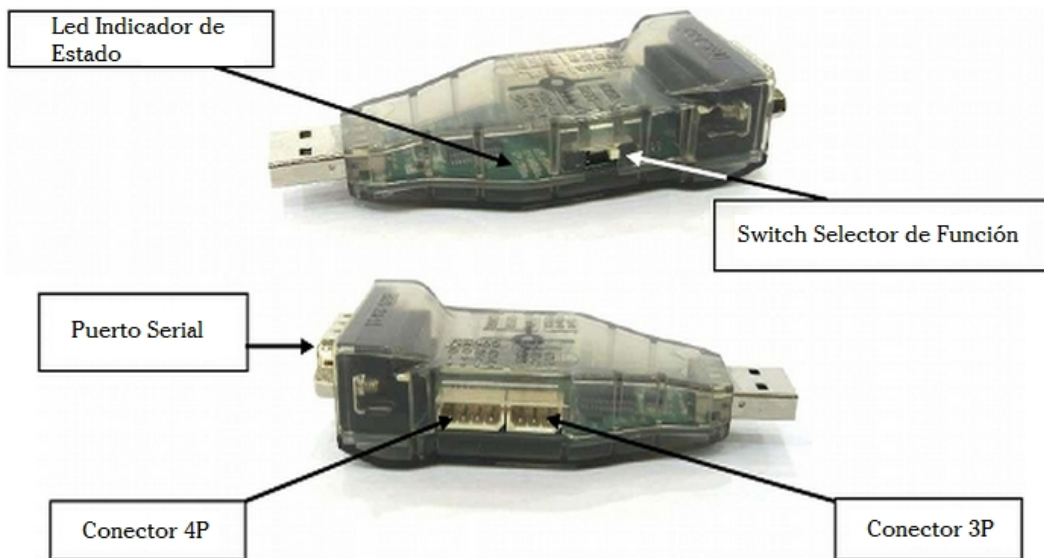


Figura 136. Usos y partes del USB2Dynamixel (Tomada de [24]).

- Led indicador de estado

Led para la visualización de los siguientes estados: alimentación, TXD (escritura de datos), y RXD (lectura de datos).

- Switch selector de función

Sirve para la selección del modo de comunicación: TTL, RS-485 y RS-232.

Los Dynamixel de serie AX y AX-S1, operan bajo el modo TTL utilizando el puerto de 3 pines para su conexión, véase figura 15. Por lo tanto se trabaja bajo ese esquema de operación.

3 Pin Cable		
Pin No.	Signal	Pin Figure
1	GND	
2	NOT Connected	
3	DATA (TTL)	

Figura 147. Modo 3 pines (Tomada de [24]).

1.2.3 Fuente de poder.

Voltaje: 12 Voltios
Corriente: 10 Amperios

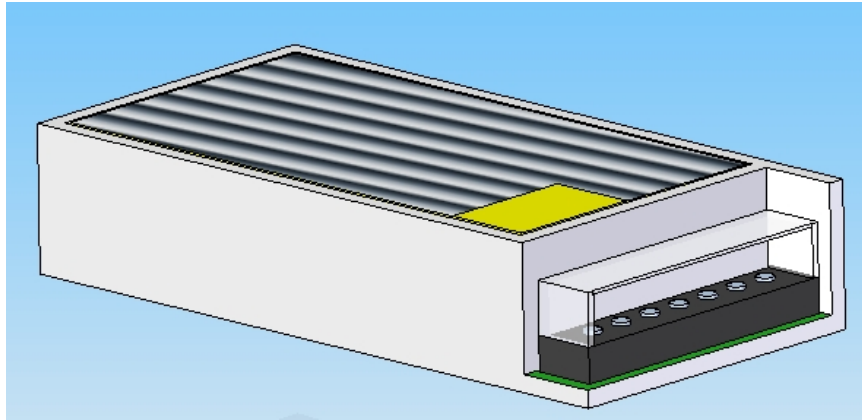


Figura 158. Fuente para alimentación del servomotor.

Ya que el USB2Dynamixel no suministra alimentación al servomotor, la energía debe ser suministrada mediante una fuente de poder externa, conectada al sistema Dynamixel de la siguiente manera, véase figura 17.

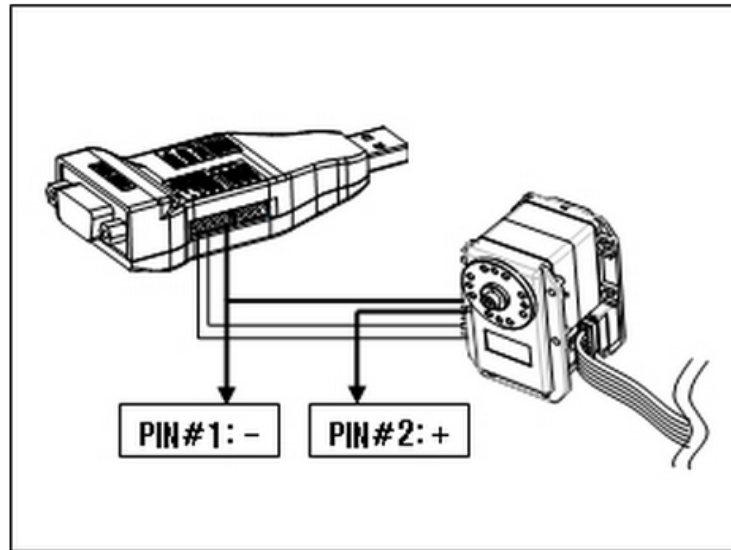


Figura 16. Esquema de conexión de la fuente al sistema (Tomada de [24]).

1.2.3.1 Forma de conexión.

Primero se divide el cable de alimentación (PIN #2) del conector del USB2Dynamixel, y la parte del cable que va hacia el servo se conecta al polo positivo (+) de la fuente.

Se conecta adicionalmente en forma de Y el cable del polo negativo (-) de la fuente de tensión a la terminal respectiva de tierra; y el cable de datos (PIN #1) del conector USB2Dynamixel se deja como está.

1.2.4 Brazo/Péndulo.

Medidas: 260 mm de largo por 100 mm de ancho en la base mayor y 30 mm de ancho en la base menor por 9 mm de grosor.

Peso: 225 gramos

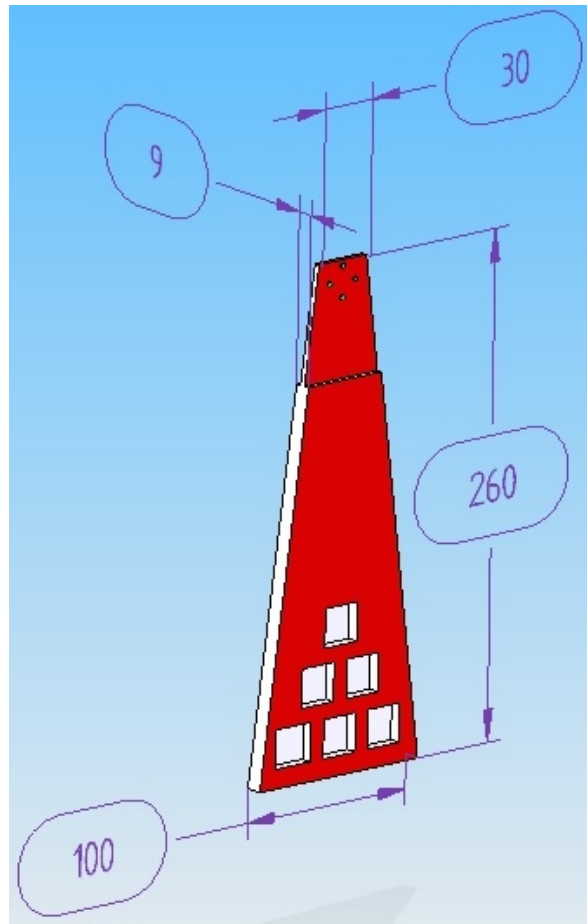


Figura 20. Brazo rígido.

Teniendo en cuenta las dimensiones adecuadas para realizar la equivalencia ideal de la definición del péndulo simple, se ha propuesto este modelo el cual posee un centro de masa en la parte inferior, así como también se han agregado unos cubículos en los que se pueden incorporar unas masas extra de considerable peso, para que la parte superior sea cada vez más despreciable, además el material componente de este brazo hace que no se genere casi esfuerzo por parte del mismo, debido a su intrínsecamente pequeña masa y de esta forma no perder la esencia del péndulo.

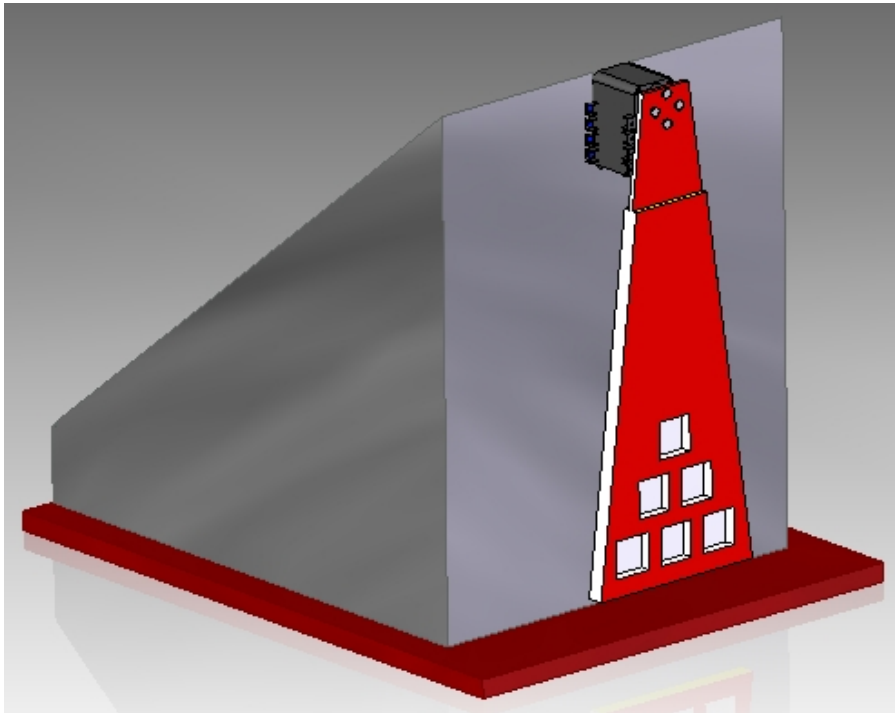


Figura 2117. Sistema mecánico pendular completo.

Esta representación es la versión final de la plataforma integrada del péndulo mecánico, en la cual se realiza la experimentación.

1.3 DYNAMIXEL SOFTWARE DEVELOPMENT KIT

Dynamixel SDK es una biblioteca de programación estándar para desarrollar la interacción entre el servomotor y el PC.

- Características

Tiene portabilidad excepcional para cada plataforma escrita en lenguaje C. La interfaz es estandarizada, por lo que el software desarrollado se puede utilizar de nuevo, incluso si el controlador es diferente.

- Comunicación
 - Paquete de envío

El envío debe ser completo, es decir, es obligatorio armar una estructura secuencial estandarizada, como la representada en la figura 20, la cual consta primero de unos bits para que el servomotor entre en disposición para la comunicación; consecuentemente se indica a quién va dirigida la instrucción, se calcula la longitud de palabra en términos vectoriales, esto con el fin de identificar cual fue la causa en el caso de que ocurra una falla en la comunicación o en la transferencia de la información. Seguido de esto, se indica el tipo de acción a ejecutar por el paquete. A continuación se especifica el parámetro de operación que se desea ajustar a conveniencia del usuario, junto con los parámetros internos que se requieran.

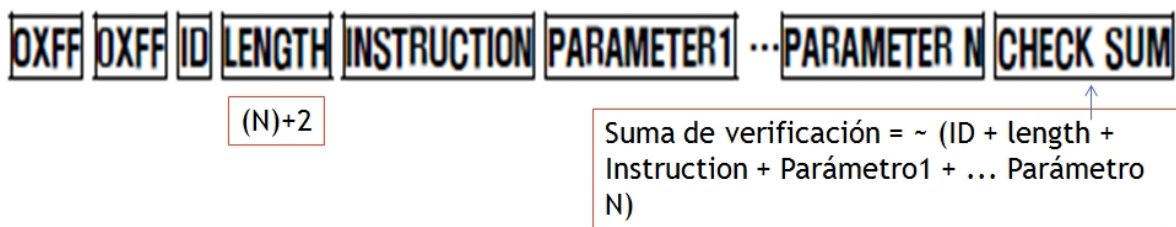


Figura 182. Vector de transmisión digital (Tomada de [25]).

Aparte del anterior método de envío, existe otra forma de acceso que se basa en lenguaje de alto nivel. De esta manera se obtiene un acceso directo a cualquier parámetro de la tabla de control en una sola línea de código, mientras que en el método de armado de paquete se establece independientemente el valor de cada casilla del vector.

- Paquete de estado actual

A diferencia de la forma anterior, ésta contiene una instancia que permite verificar si ocurrió una interferencia debido a un error en la programación o que se superó algún límite del rango de funcionamiento normal de una variable física.

0XFF 0XFF ID LENGTH ERROR PARAMETER1 PARAMETER2...PARAMETER N CHECK SUM

ERROR

It displays the error status occurred during the operation of Dynamixel.

The meaning of each bit is described in the below table.

Bit	Name	Contents
Bit 7	0	-
Bit 6	Instruction Error	In case of sending an undefined instruction or delivering the action command without the reg_write command, it is set as 1.
Bit 5	Overload Error	When the current load cannot be controlled by the set Torque, it is set as 1.
Bit 4	Checksum Error	When the Checksum of the transmitted Instruction Packet is incorrect, it is set as 1.
Bit 3	Range Error	When a command is out of the range for use, it is set as 1.
Bit 2	Overheating Error	When internal temperature of Dynamixel is out of the range of operating temperature set in the Control table, it is set as 1.
Bit 1	Angle Limit Error	When Goal Position is written out of the range from CW Angle Limit to CCW Angle Limit, it is set as 1.
Bit 0	Input Voltage Error	When the applied voltage is out of the range of operating voltage set in the Control table, it is as 1.

Figura 193. Estados de error (Tomada de [25]).

La lectura del valor hexadecimal de la casilla de error se interpreta así, si el valor es 0X00 muestra que no existió ningún error en la transferencia y aceptación de la información, de lo contrario el primer paso es convertirlo en su equivalente número binario e identificar qué bit quedó en '1' y según la figura 21, visualizar a qué tipo de error pertenece el bit.

1.3.1 Interfaz de programación de aplicaciones

El conjunto API para el desarrollo del software de programación, basado en el lenguaje de programación estándar C, se divide en los siguientes grupos de funciones:

- Forma de inicialización y control de los dispositivos de comunicación

<code>dxl_initialize</code>	<code>dxl_terminate</code>
-----------------------------	----------------------------

- Ensamblaje y visualización de paquetes

<code>dxl_set_txpacket_id</code>	<code>dxl_get_rxpacket_error</code>
<code>dxl_set_txpacket_instruction</code>	<code>dxl_get_rxpacket_length</code>
<code>dxl_set_txpacket_parameter</code>	<code>dxl_get_rxpacket_parameter</code>
<code>dxl_set_txpacket_length</code>	<code>dxl_makeword</code>
<code>dxl_get_lowbyte</code>	<code>dxl_get_highbyte</code>

- Ordenes relacionadas con la transferencia y recepción de paquetes

<code>dxl_tx_packet</code>	<code>dxl_rx_packet</code>
<code>dxl_txrx_packet</code>	<code>dxl_get_result</code>

- Funciones de comunicación de alto nivel para acceso requerido por el usuario

dxl_ping	dxl_read_byte
dxl_write_byte	dxl_read_word
dxl_write_word	

- Funciones extra para tipos de dato Word y Byte

dxl_makeword	dxl_get_highbyte
dxl_get_lowbyte	

2. DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL PROYECTO

Este programa es realizado bajo la plataforma de MATLAB R2012b y con la versión 1.02 del Dynamixel SDK.

Para evaluar el efecto del contenido armónico en la trayectoria de referencia del sistema, es necesario comparar dos señales similares con distinto contenido armónico. Para ello se requiere partir de la señal sinusoidal y obtener su equivalente polinomial el cual es comúnmente utilizado para generar trayectorias articulares.

Para determinar la aproximación más acorde se contemplaron las siguientes posibilidades:

- Generación de un polinomio de grado 5 por periodo

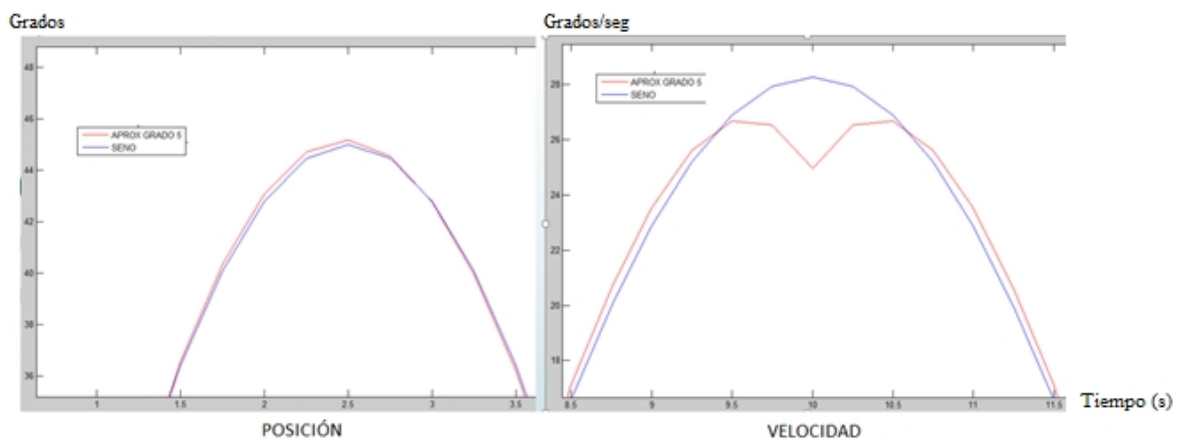


Figura 2420. Posición y Velocidad, Sinusoidal vs Polinomial.

Como se puede apreciar en la figura 24 hay cierto detrimento en los puntos críticos de la velocidad, por lo que no se puede tomar en cuenta.

- Generación de un polinomio de grado 5 por medio periodo

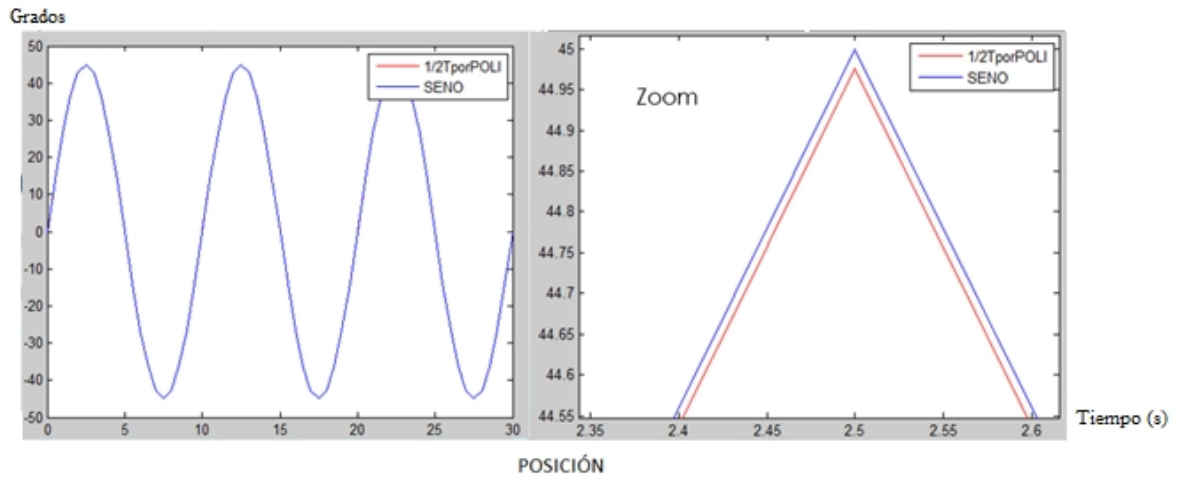


Figura 2125. Posición, Sinusoidal vs Polinomial grado 5.

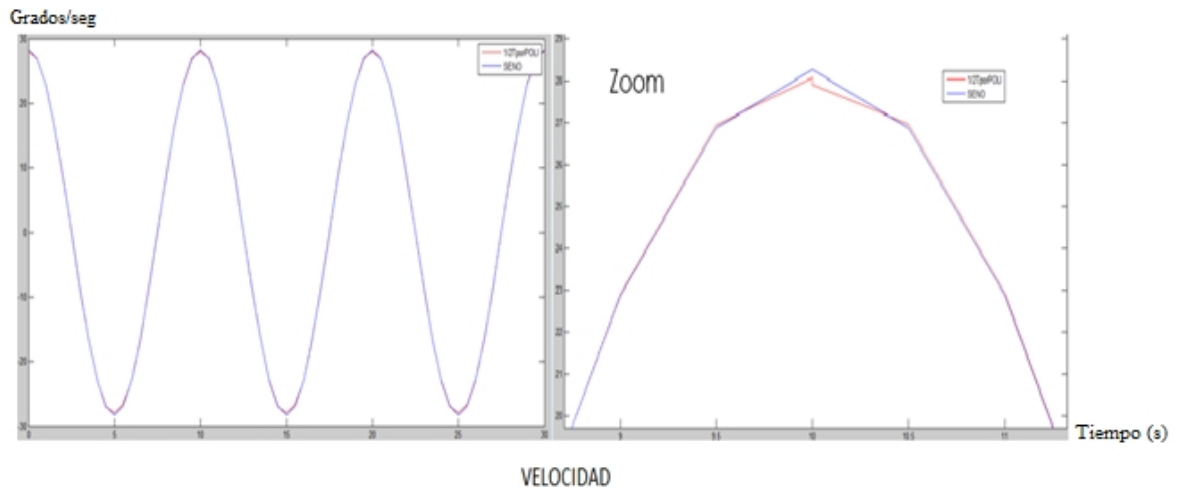


Figura 2622. Velocidad, Sinusoidal vs Polinomial grado 5.

Se observa que la aproximación en las figuras 25 y 26 es buena, pero ahora es conveniente buscar el menor grado de polinomio que sea capaz de seguir la señal original, según [2].

- Generación de un polinomio de grado 4 por medio periodo

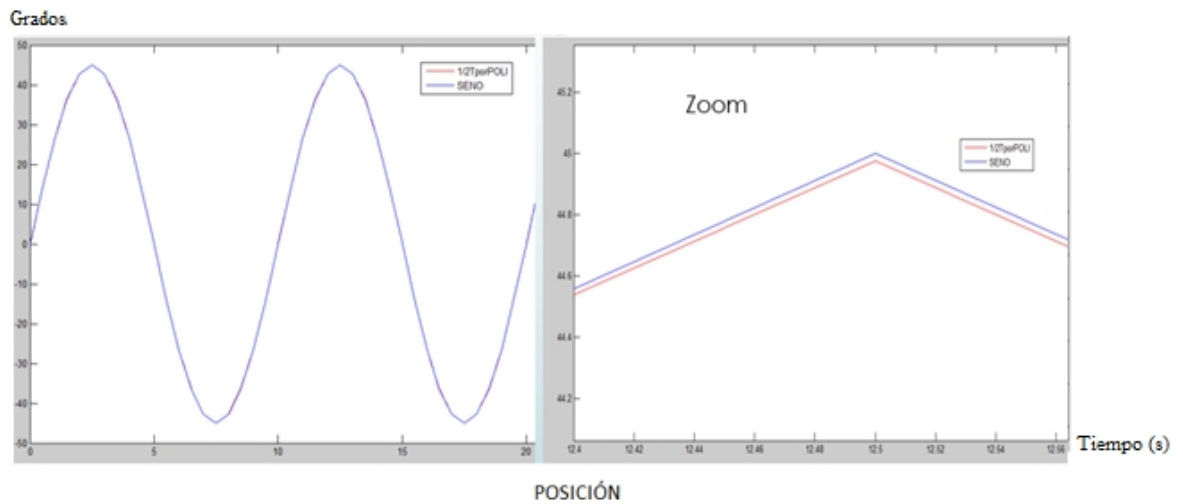


Figura 2723. Posición, Sinusoidal vs Polinomial grado 4

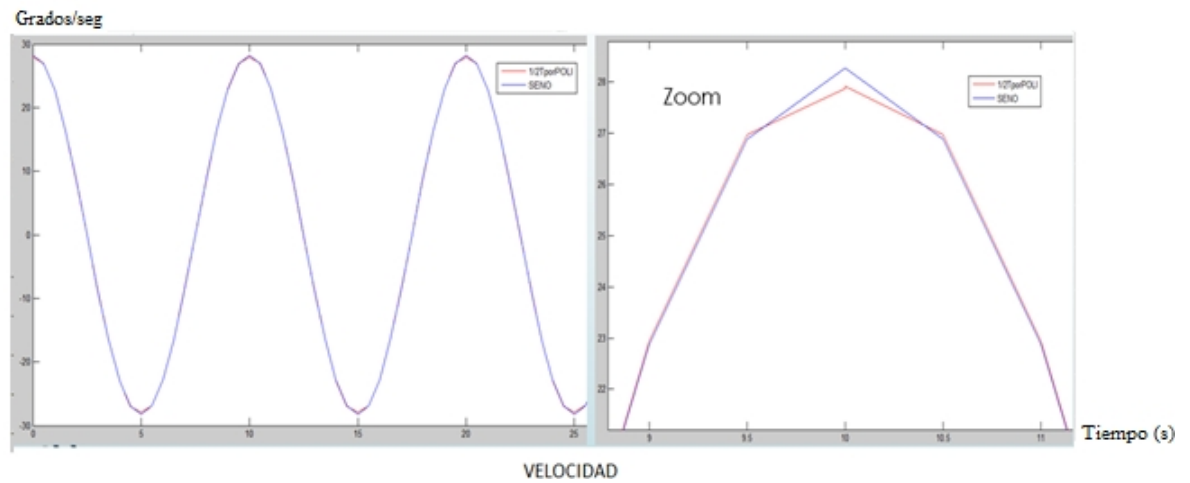


Figura 2824. Velocidad, Sinusoidal vs Polinomial grado 4

Esta opción resulta ser la más adecuada y por ende se determina como base para el estudio, ya que se alcanza una eficacia suficiente en la aproximación.

El siguiente análisis se realiza con el objetivo de considerar algún tipo de correlación a partir del valor de carga presente obtenido por el servomotor para determinar el valor proporcional de torque ejercido por el mismo, teniendo en cuenta que en el manual de instrucciones de uso del kit de Dynamixel, indican que el valor de carga es inferido de un valor interno de torque.

Esta opción de hacer uso de la magnitud del torque para estimar energía, se consideró como la más factible y rápida de implementar, puesto que no se requieren componentes extras.

A continuación se expone el software en módulos generalizados con el fin de argumentar el tratamiento, necesario para interactuar bidireccionalmente con el sistema.

2.1 ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO SENSANDO EL TORQUE

2.1.1 FUNCIÓN: ENVIAR TRAYECTORIA AL SERVO

Se declara una función para encapsular todas las tareas de protocolo del programa y que se ejecuten por defecto, quedando independientes del desarrollo puntual del usuario.

```
function [Torque] = enviar_trayectoria_al_servo(Posicion, Velocidad, h)
```

Se indica el directorio donde se encuentra ubicada la librería propia de Dynamixel

```
    dynamixelf = fullfile('C:', 'DYNAMIXEL', 'dxl_sdk_win64_v1_02', 'import', 'dynamixel.h');
```

Se sincroniza con Matlab

```
    loadlibrary('dynamixel.dll', dynamixelf);
```

Se realiza la verificación de que fueron incluidas las funciones de Dynamixel en Matlab

```
libfunctions('dynamixel');
```

Configuración del puerto de comunicación y velocidad de transferencia de datos, de acuerdo al requerimiento

```
DEFAULT_PORTNUM = 6;  
DEFAULT_BAUDNUM = 1;
```

Se escoge la máxima velocidad de transferencia, según la tabla 3.

Se utiliza la función 'calllib' propia de Matlab para hacer uso de las funciones de Dynamixel, inicializando y verificando comunicación

```
[result] = calllib('dynamixel','dxi_initialize',DEFAULT_PORTNUM,DEFAULT_BAUDNUM);  
if result == 1  
    fprintf('SINCRONIZACIÓN EXITOSA!');  
else  
    fprintf('SINCRONIZACIÓN FALLIDA ¿?');  
end
```

Se adecua el control de movimiento para que la trayectoria se suavice y se vea natural, de acuerdo a la masa del péndulo y la inercia que este conlleva, véase la figura 27

```
calllib('dynamixel','dxi_write_byte',1,26,2)  
calllib('dynamixel','dxi_write_byte',1,27,2)  
calllib('dynamixel','dxi_write_byte',1,28,128)  
calllib('dynamixel','dxi_write_byte',1,29,128)
```

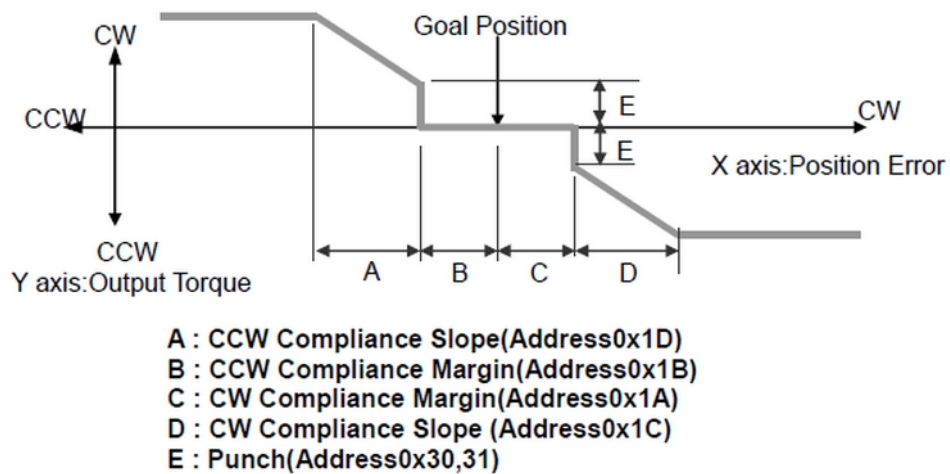


Figura 29. Tolerabilidad en el control de posición (Tomada de [23]).

- CW: Clock Wise (El movimiento se dirige en el sentido de las manecillas del reloj).
- CCW: Counter Clock Wise (El movimiento se dirige en contra de las manecillas del reloj).

Ubicación según la tabla 3, de la velocidad y la posición

```

|   Word_Posicion  = 30;
|   Word_Velocidad = 32;

```

Valor inicial de la posición del péndulo, véase la figura 28

```

|   calllib('dynamixel', 'dxl_write_word', 1, 30, 512);

```

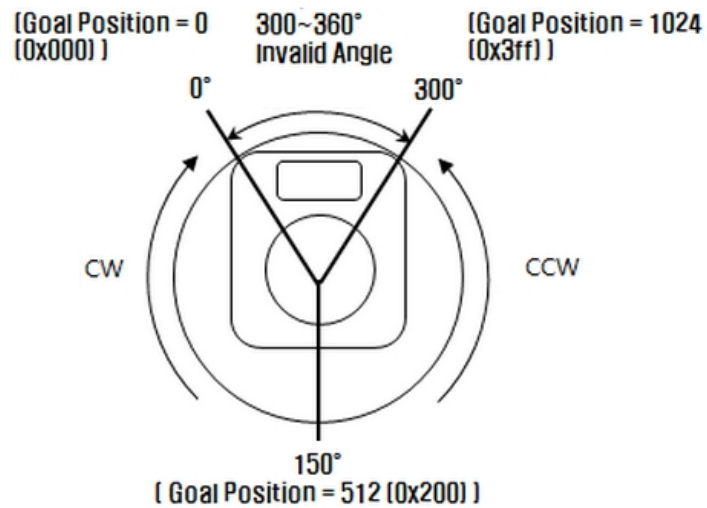


Figura 30. Rango de posición (Tomada de [23]).

La anterior figura, fue adaptada según los requerimientos del proyecto

- -150° corresponde a 0.
- 0° corresponde a 512.
- 150° corresponde a 1024.

Ecuación de adaptación, según lo anterior

$$\text{Posicion} = (\text{Posicion} + 150) * 1024 / 300;$$

Velocidad deseada en r.p.m.

$$\text{Velocidad} = \text{Velocidad} * 60 / (2 * \pi);$$

Velocidad ajustada a la escala de Dynamixel

$$\text{Velocidad} = \text{Velocidad} * 1023 / 113.5;$$

Cuando la velocidad es negativa (CW), se realiza un ajuste de rango para que arroje un valor comprendido entre (1024 – 2047)

$$\text{Velocidad}(\text{Velocidad} < 0) = \text{abs}(\text{Velocidad}(\text{Velocidad} < 0)) + 1023;$$

Se reserva espacio en memoria para almacenar todos los datos del Torque

```
Torque = zeros(size(Posicion));
```

Se crea un bucle de envío de datos. Mediante la función (tic-toc), se hace efectivo el periodo de muestreo, obligando al compilador a esperar hasta que se complete. Se hace lectura del torque en el transcurso del movimiento y se controla que cada envío (uno a uno), se ejecute después de haber llegado satisfactoriamente a la posición anterior

```
for i = 1:length(Posicion),  
    tic;  
    calllib('dynamixel', 'dxl_write_word', 1, Word_Velocidad, Velocidad(i));  
    calllib('dynamixel', 'dxl_write_word', 1, Word_Posicion, Posicion(i));  
    Torque(i) = int32(calllib('dynamixel', 'dxl_read_word', 1, 40));  
  
    while calllib('dynamixel', 'dxl_read_word', 1, 46) == 1, end;  
  
    while toc < h, end;  
end
```

Se guardan los datos de torque obteniendo solo su magnitud y se convierte en unidad de porcentaje. Por seguridad se finaliza la comunicación y la conexión con la librería

```
Torque(Torque > 1023) = -(Torque(Torque > 1023) - 1024);  
Torque = 100 * Torque / 1023;  
calllib('dynamixel', 'dxl_terminate');  
unloadlibrary dynamixel;  
end
```


2.1.2 GENERAR TRAYECTORIAS PARA MOVIMIENTO TIPO SINUSOIDAL

Se declaran las constantes que constituyen los parámetros de la función a ser representada:

A: Amplitud de oscilación $[-150^\circ, 150^\circ]$

T: Periodo de oscilación (debe de cumplirse la relación $T/\text{Puntos} = 0.5$ s)

W: Frecuencia angular

NP: Número de periodos para la señal

h: Periodo de muestreo

La siguiente función representa una base para generar trayectorias articulares periódicas de contenido armónico variable, capaz de introducir dinámicas secundarias adicionales en el sistema y de esta manera, generar cualquier tipo de referencia basada en Series de Fourier. En el vector W, el usuario puede ingresar los armónicos que desee, con su respectiva fase (Th) y Amplitud (A).

```
W          = [pi/4 pi/10];
Th         = [12 20];
A          = [25 45];

TMin      = 2 * pi / max(W);
NP        = 3;
Puntos    = 30;
h         = TMin / Puntos;
t         = (0:h:NP*TMin)';

% Posicion deseada en radianes
Posicion  = zeros(size(t));

A = sum(A);
W = sum(W);
Th = sum(Th);

Posicion  = A * sin(W*t + Th);

% Velocidad deseada en rad/seg
Velocidad = zeros(size(t));

Velocidad = A * W * cos(W*t + Th);
```

Al determinar la derivada de la posición, se obtiene la velocidad idónea para que la trayectoria sea suave y síncrona, conforme a la naturaleza intrínseca de un péndulo.

Se llama la función de envío y ejecución de trayectoria del servo para la evaluación de la posición y la velocidad de una determinada muestra

```
[Torque] = enviar_trayectoria_al_servo(Posicion, Velocidad, h);
```

Se grafica el torque obtenido

```
plot(t, Torque, 'r');  
title('Torque (Porcentaje)');  
xlabel('Tiempo [segundos]');
```

Se hace el cálculo de la energía consumida, a través de la integral del producto entre el torque y la velocidad angular

```
Energia = sum(Torque .* Velocidad) * h
```

Se almacenan los datos obtenidos

```
NombreArchivo = sprintf('trayectoria_senoidal_T_%d_Puntos_%d', T, Puntos);  
save(NombreArchivo, 't', 'Posicion', 'Velocidad', 'Torque', 'Energia');
```

2.1.3 GENERAR TRAYECTORIAS PARA MOVIMIENTO TIPO POLINOMIAL

Se declaran las constantes que constituyen los parámetros de la función a ser representada:

A: Amplitud de oscilación (grados).
T: Periodo de oscilación (segundos).
W: Velocidad angular (radianes/segundo).

```
A = 45;  
T = 24;  
W = 2 * pi / T;
```

Definición del periodo de muestreo y número de periodos para la señal

```
Puntos          = 40;  
h               = T/Puntos;  
t               = (0:h:T)';
```

Función de trayectoria polinomial deseada

```
PosSeno         = A * sin(W*t);  
Coef            = polyfit(t, PosSeno, 4);  
Posicion        = polyval(Coef, t);
```

Para este caso, se realizó una aproximación por mínimos cuadrados de la señal sinusoidal original, a través de un polinomio de orden cuatro. Finalmente, se decidió adoptar este método como definitivo para la experimentación, ya que esta aproximación es la más conveniente para el caso de estudio.

Velocidad acorde a la naturaleza del péndulo (rad/seg)

```
CoefDer         = polyder(Coef);  
Velocidad       = polyval(CoefDer, t);
```

Al determinar la derivada de la posición, se obtiene la velocidad idónea para que la trayectoria sea suave y síncrona.

Se llama la función de envío y ejecución de trayectoria del servo para la evaluación de la posición y la velocidad de una determinada muestra

```
Posicion        = [Posicion; Posicion; Posicion];  
Velocidad       = [Velocidad; Velocidad; Velocidad];  
Torque          = enviar_trayectoria_al_servo(Posicion, Velocidad, h);
```

Para este caso, se hace necesario dividir los tres periodos de evaluación con sus respectivos valores para la posición y la velocidad, ya que el polinomio no es capaz de aproximar más de un periodo a la vez de forma aceptable.

Se grafica el torque obtenido

```
t = [t;t+T;t+2*T];
plot(t,Torque,'r');
title('Torque (Porcentaje)');
xlabel('Tiempo [segundos]');
```

Se divide el tiempo en tres partes iguales para evaluar los tres vectores de posición y velocidad, respectivamente.

Se hace el cálculo de la energía consumida, a través de la integral del producto entre el torque y la velocidad angular

```
Energia = sum(Torque .* Velocidad) * h
```

Se almacenan los datos obtenidos

```
NombreArchivo = sprintf('trayectoria_polinomial_T_%d_Puntos_%d',T,Puntos);
save(NombreArchivo,'t','Posicion','Velocidad','Torque','Energia');
```

2.1.4 COMPARACIÓN DE SEÑALES

Para efectos de comparación entre señales se hace uso de los ítems **2.1.2** y **2.1.3**, teniendo en cuenta que la sinusoidal se genera con única frecuencia, puesto que es más práctico realizar el análisis comparativo para cada frecuencia en particular.

Se cargan en el espacio de trabajo los archivos generados por cada toma o muestra en el experimento, a partir del directorio raíz donde se almacenaron

```
% Archivo 1.
[filename, pathname] = uigetfile('*.mat');
Tr1 = load(strcat(pathname,filename));

% Archivo 2.
[filename, pathname] = uigetfile('*.mat');
Tr2 = load(strcat(pathname,filename));
```

Se extraen los valores obtenidos del torque de cada señal respectivamente, y se comparan gráficamente

```
%% Compare.
figure;
plot(Tr1.t,Tr1.Torque,'r.--',Tr2.t,Tr2.Torque,'b.-');
legend('Senoidal','Polinomial');
title('Torque (Porcentaje)');
xlabel('Tiempo [segundos]');
```

Se grafica la posición de cada señal, verificando la equivalencia de la trayectoria de referencia

```
% Posicion
figure;
plot(Tr1.t,Tr1.Posicion,Tr2.t,Tr2.Posicion);
legend('Senoidal','Polinomial');
title('Posicion (Grados)');
xlabel('Tiempo [segundos]');
```

Se comparan las velocidades entre las dos señales respectivamente, esto con el objetivo de comprobar la veracidad en la escogencia de dos señales semejantes

```
% Velocidad
figure;
plot(Tr1.t,Tr1.Velocidad,Tr2.t,Tr2.Velocidad);
legend('Senoidal','Polinomial');
title('Velocidad (Grados/Segundo)');
xlabel('Tiempo [segundos]');
```

Finalmente, se obtiene la comparación respectiva entre las dos señales de estudio, para verificar si hubo ahorro energético, sumando al cálculo de la energía anteriormente obtenida en el los ítems 3.2 y 3.3, tomando la potencia promedio como factor de verificación

```
% Potencia Promedio
fprintf('Potencia promedio sinusoidal = %f\n',Tr1.Energia/(3*Tr1.T));
fprintf('Potencia promedio polinomial = %f\n',Tr2.Energia/(3*Tr2.T));
```

El siguiente código para la adquisición de datos de corriente eléctrica, está implementado en Arduino 1.0.6.

2.2 ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO SENSANDO LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Teniendo en cuenta la etapa de resultados (**Capítulo 3**) para el ítem **2.1**, donde se pretende establecer los análisis basándose en la medición de la energía mecánica y ya que no son los esperados, surge la necesidad de buscar otra alternativa como solución que genere datos confiables y exactos. Debido a esto se desarrolla un sensor de corriente eléctrica (**ANEXO B**) para trabajar en términos de consumo de energía eléctrica.

Para este análisis se reutilizan los módulos de código fuente establecidos en el ítem **2.1**. Las adaptaciones se muestran a continuación junto con el código desarrollado en Arduino para la captura de estos datos.

2.2.1 SOFTWARE ADAPTADO PARA MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Se requiere efectuar la sincronización de la toma de datos de la corriente eléctrica, al mismo tiempo que se ejecuta la trayectoria seguida por el servomotor.

Por lo tanto, se crea una función dentro de Matlab para poder tratar los datos y hacer uso de ellos de forma digital.

```
function [V] = enviar_trayectoria_al_servo(Posicion, Velocidad, h)
```

Se indica que retorne el vector V, para poder interactuar con los resultados.

Se inicializan los parámetros de configuración de la comunicación serial

```
V          = zeros(91,1);
hh=h*1000;
Puerto = 'COM11';
S1 = serial(Puerto, 'BaudRate', 14400);
fopen(S1);
pause(1);
fwrite(S1, hh, 'uint8');
i=1;
```

Siendo h un valor en segundos, se multiplica por 1000 para realizar la conversión a milisegundos.

El puerto “COM11” está asignado para la comunicación serial con Arduino.

Se define la velocidad de datos en bits por segundo (baudios) para la transmisión por el puerto serial, de igual magnitud que Arduino.

Se declara abierto el puerto serial y se procede, después de una pausa adecuada, a transmitir el tiempo de muestreo.

De esta forma es como se realiza la correcta y sincronizada adquisición y conversión de datos de voltaje en el rango establecido de (0, 4.92) V.

```
% Envio de datos al servo
while i <= length(Posicion),

    V(i) = str2double(fgets(S1))*4.92/1023;
    i=i+1;
    % Espera hasta que se complete un tiempo h
    while toc < h, end;

end
```

Puesto que la transmisión de datos a través del puerto serie se hace en forma de cadena desde Arduino, se hace necesario convertir a dato tipo “double” en Matlab mediante la función “str2double” para poder operarlo matemáticamente.

Dentro del programa donde se realiza la configuración de trayectoria y el tratamiento estadístico de los datos, se recibe el voltaje obtenido y almacenado previamente y se procede a dividirlo por la ganancia generada a partir del acondicionamiento de la señal para obtener la corriente (3), la cual es de interés para el análisis energético.

```
[V] = enviar_trayectoria_al_servo(Posicion, Velocidad, h);
```

```
Corriente = V/16.8907563;    (3)
```

Con la corriente eléctrica se realiza el cálculo de la potencia consumida por el servomotor, para esto se resta la potencia de la fuente con la potencia consumida en la resistencia, teniendo en cuenta que,

$$P = \frac{i^2}{R} \quad (4)$$

De (4), para la potencia en la resistencia con $R= 1\Omega$ se tiene,

$$P = i^2 \quad (5)$$

```
PotenciaS = (Corriente.*12)-(Corriente.^2);
```

```
% Graficar
```

```
stem(t, PotenciaS, 'r');
```

```
title('PotenciaS (W)');
```

```
xlabel('Tiempo [segundos]');
```


Por último se calcula el consumo generado por cada trayectoria, el cual es equivalente a la diferencia de las integrales de las potencias anteriormente calculadas para el intervalo de tiempo respectivo, y se almacena la información.

```
% Calculo de energia
Energia1 = sum(Corriente .* 12) * h;
Energia2 = sum(Corriente .* Corriente) * h;
EnergiaS = Energia1-Energia2;
% Guardad datos

NombreArchivo = sprintf('trayectoria_senoidal_%d_T_%d_Puntos_%d',N,T,Puntos);
save (NombreArchivo, 't', 'Posicion', 'Velocidad', 'Potencias', 'Energias');
```

2.2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA ARDUINO MEGA ADK

Se utiliza la tarjeta Arduino como herramienta para realizar la toma y transmisión de datos, teniendo en cuenta que se están recibiendo valores de voltaje, los cuales posteriormente serán convertidos a su equivalente de corriente.

Se declaran las variables globales a utilizar

```
int V [90];
int h=(50000/30)-30;
int i=0;
int N = 0;
int comenzar = 0;
```

Donde,

V: es un vector de 90 posiciones, equivalentes a 30 muestras por periodo, siendo 3 los periodos tomados para cada señal.

h: es el tiempo de muestreo.

Dentro del setup se establece la velocidad de datos en bits por segundo (baudios) para la transmisión por el puerto serial

```
void setup() {  
    Serial.begin(14400);  
    Serial.flush();  
}
```

Serial.flush, espera a que la transmisión de datos de salida del puerto serial esté completa para continuar.

Entrando en la cadena de programación se inicia con la función SerialEvent, a la cual se accede cuando hay datos disponibles en el buffer del puerto serial

```
void serialEvent(){  
    comenzar = 1;  
}
```

Cuando se da la orden “comenzar”, automáticamente se pasa a leer lo que hay en el lazo de forma consecutiva

```
void loop() {  
    if(comenzar == 1)  
    {  
        comenzar=0;  
  
        while (i<90)  
        {  
            V[i] = analogRead(A1);  
            delay(30);  
            Serial.println(V[i]);  
            i=i+1;  
            delay(h);  
        }  
        Serial.end();  
        Serial.begin(14400);  
    }  
}
```

Claramente, si la condición “comenzar” se cumple, Arduino empieza a leer lo que se encuentra en el puerto analógico, adjuntándolo en un vector inicialmente declarado, dando una espera entre lectura para pasarlo a imprimir en el puerto serial el número de veces que se desea tomar los datos.

Se cierra la comunicación serial para que no haya conflicto de lectura bidireccional y después se vuelve a abrir la comunicación.

3. RESULTADOS

En la siguiente figura se puede apreciar un ejemplo puntual de la utilización del generador automático de trayectorias de contenido armónico variable.

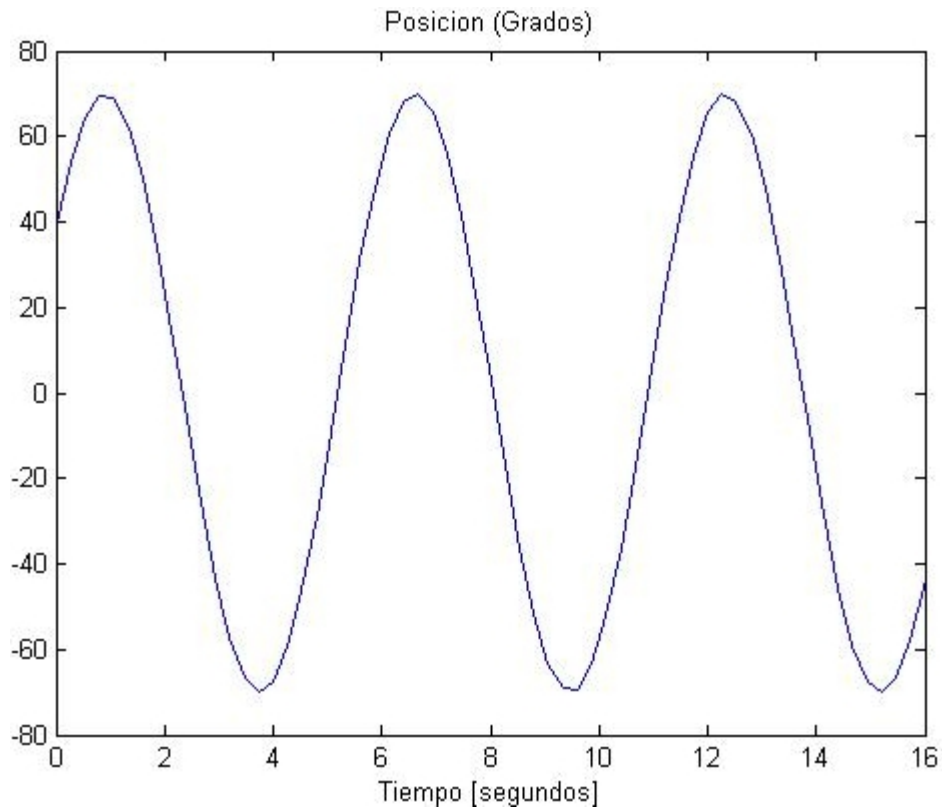


Figura 31. Trayectoria Sinusoidal con dos armónicos.

La anterior gráfica es la señal sinusoidal de referencia con dos componentes armónicos y sus respectivos desfases, donde,

- W1 = $\pi/4$
- W2 = $\pi/10$
- Th1 = 12
- Th2 = 20
- A1 = 45
- A2 = 25

A continuación se plantea el respectivo análisis para todos los resultados obtenidos, sometiendo a consideración criterios que permitan evaluar la diferenciación del consumo energético, entre el manejo usual de un sistema mecánico en el cual no se tiene en cuenta la optimización de recursos, y otro con el que se ha experimentado hasta llegar a la posibilidad de contemplar una disminución considerable de energía, que se está desperdiciando cuando hay una defectuosa relación de contenido armónico, en su trayectoria de referencia.

3.1 EN TÉRMINOS DE ENERGÍA MECÁNICA

La experimentación para determinar el consumo de energía mecánica, partiendo del torque, se realizó cincuenta veces por periodo para obtener contundencia en la información. Se consideró tomar datos para periodos comprendidos entre 10 y 60 segundos. Además de esto se determinaron, para generar la trayectoria de referencia, 40 puntos por periodo y se hizo finalmente una comparación variando el parámetro "Slope" (pendiente de llegada) para observar el efecto que éste ocasiona en el consumo.

Las siguientes tablas ilustran los resultados de energía media para las diferentes trayectorias y se calculan el promedio y la desviación estándar respectivamente.

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE= 70	T=10		T=15		T=20		T=25	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	176,9941	578,4909	332,4808	19,2457	483,9796	417,2785	335,1522	337,8650
	205,6652	680,1023	498,6901	93,6776	607,2066	252,7827	260,0198	456,5090
	467,3054	606,7822	358,2261	45,7890	177,1332	329,9730	312,7330	328,0466
	544,4038	619,6528	196,2297	72,7154	352,5857	358,5759	386,1587	339,5940
	642,1580	647,2185	149,1824	50,3017	428,2687	274,7621	313,9373	304,5008
	545,6997	694,3473	323,1620	57,4544	397,0622	265,6484	692,5463	302,1271
	480,8809	536,0937	286,3341	141,5281	423,3716	331,9981	416,6860	292,6598
	593,4097	675,4267	436,6198	108,1315	432,2266	538,8287	436,4065	242,1629
	721,1447	670,4012	341,2918	76,8683	495,8592	366,6015	257,8634	535,1584
	440,6454	577,1893	249,8496	227,1675	511,3336	259,6422	232,8017	459,6635
	532,5263	574,6458	241,4519	245,4263	548,4027	244,4918	441,4918	316,4894
	463,4338	591,6288	111,1820	54,9837	588,8672	400,8817	191,9766	339,5480
	544,3020	567,6688	322,4946	79,3396	555,8520	304,4602	446,2211	371,8145
	641,1779	562,1977	299,0540	221,4602	572,0677	161,9562	668,8985	359,2716
	600,1996	582,4515	632,4158	79,8299	592,4743	344,6737	332,9045	388,1342
	556,1569	654,1907	595,3021	132,2157	214,4846	275,1150	522,5256	245,1781
	548,5861	631,1868	155,2846	45,6372	282,1303	506,9654	528,7116	224,2817
	608,7734	596,6320	280,6312	188,4047	342,1610	354,5299	491,3859	369,2066
	482,3627	552,6155	318,1342	70,0214	230,0247	365,7370	520,7537	191,0707
	514,2002	613,8186	332,1030	73,0380	349,2648	182,5265	505,2078	379,2855
	444,4075	673,6594	689,2089	120,0942	363,0816	370,9178	644,9399	352,7132
	641,1456	519,7940	283,4852	33,9264	352,3236	355,2868	293,1643	469,9861
	523,7141	642,0442	394,7001	224,9588	136,0230	392,7773	275,1828	452,6461
	501,7469	603,8314	257,9529	37,9554	312,0529	417,2872	653,7408	379,9722
	505,8476	681,4954	338,7407	77,1142	334,3325	308,0011	328,0519	223,8331
	469,1001	573,8286	366,5473	248,2689	270,2176	318,6602	335,1522	472,5639
	587,2783	722,7734	319,5406	132,2157	728,0885	334,2894	292,1789	474,0164
	544,4086	561,6123	91,3091	254,5375	477,3759	414,6869	317,8253	334,2431
	484,7961	714,4549	463,3108	288,3724	457,4555	213,6135	228,9829	232,2495
	585,4519	729,3895	299,7065	475,4261	554,3221	398,8697	233,2449	260,5330
	629,1522	666,7448	336,6792	60,7585	397,6690	406,9776	232,4976	266,6059
	647,6889	692,8000	321,5911	248,2689	295,8762	220,2603	173,6881	363,4739
	644,6371	735,0764	111,1820	323,3391	392,6117	457,3047	260,0198	274,8642
	612,6650	633,8578	396,8783	463,6800	419,6247	522,5552	346,1414	467,1128
	716,3088	654,0604	241,4519	58,6824	329,3666	494,3296	93,3271	470,8044
	781,7396	716,3265	46,2763	72,7154	522,0415	423,5577	423,6489	427,7864
	615,2161	686,1859	123,9623	93,3427	414,0109	327,8111	411,2480	301,3769
	688,9020	729,2082	155,2846	40,8564	407,5266	261,9418	294,1956	497,0034
	841,9578	697,8378	210,5225	89,1792	462,0537	315,0023	607,5198	324,9153
	664,6272	751,6428	271,0239	188,4047	493,6459	435,0939	528,4061	352,7898
	679,9717	763,5041	324,9629	67,5066	400,7586	444,7838	568,4666	328,8547
	627,3301	698,1850	242,3513	301,6693	356,7893	354,6508	371,0952	387,2656
	662,7762	680,1352	649,8708	319,2099	381,0772	459,3381	262,8508	267,2093
	654,5183	743,5494	655,4384	372,5269	341,0926	459,6991	576,6942	217,7620
	637,9119	711,8001	717,4991	132,2157	627,3754	354,2251	500,9497	233,3043
	578,8422	669,7582	394,7001	60,4645	526,8787	242,2757	416,2658	298,5366
	586,6587	735,8908	659,8683	221,4602	348,6016	429,9567	339,0422	275,5527
	710,1115	909,5776	395,4294	188,4047	317,1403	198,5856	221,6627	250,1323
	762,6783	737,0476	698,5873	141,5281	434,3438	259,4943	345,6440	454,1697
	718,5919	729,3826	90,6227	67,6168	353,2597	371,6715	272,6692	476,1492
Promedio	581,2042	659,5639	340,1761	149,7587	415,8355	350,0267	382,8576	347,4199
Desviación	121,7149	74,1902	173,3260	112,5853	121,0891	90,7231	142,6437	88,5964

Tabla 8. Energía mecánica [(% de torque)(grados / segundo)], funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 70. Horas de compilación = 30

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE= 70	T=30		T=35		T=40		T=45	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	661,5052	351,1356	503,5071	463,3093	216,3520	280,5012	563,1068	441,8623
	281,1989	348,5931	205,9968	300,2517	564,0448	370,0048	363,3420	374,8014
	285,7210	189,9826	244,6183	325,0707	581,3911	340,7817	545,4034	330,3932
	228,9062	396,2876	139,4801	397,9928	476,4315	420,9078	690,4669	409,7540
	268,1069	380,7729	375,7318	356,2674	128,2227	433,1782	232,5444	373,6189
	364,9761	443,7999	437,6715	315,8015	560,0045	343,8576	153,7199	267,9847
	362,8617	263,5703	361,1101	313,5718	660,9327	410,2164	460,2410	499,7344
	312,8364	358,2621	387,5677	271,2541	418,7716	268,1938	531,0909	363,9552
	626,1740	233,8946	464,8191	389,8311	414,3335	337,7422	641,5723	536,2480
	625,8140	362,6165	392,0027	293,4031	668,0493	448,4117	482,9215	362,5177
	623,6388	391,8626	530,5781	312,3681	660,6806	266,9516	449,5433	399,5033
	720,7010	335,1446	480,0041	464,0378	278,5472	381,2660	289,1066	355,6946
	260,6788	266,3060	346,8950	366,8526	489,6026	331,5438	147,6975	396,7937
	564,5809	364,4093	300,3980	337,5555	460,3743	360,8628	271,4497	336,5958
	435,0161	453,0203	495,7569	277,7177	194,9469	298,5254	530,9060	251,7319
	372,3035	346,3727	464,3679	443,1144	434,4400	338,9883	697,2072	377,8247
	218,7805	267,9414	389,4109	453,6357	385,7733	388,3346	32,2469	385,9820
	147,0760	332,5956	345,0748	338,1633	292,4039	487,1408	300,1836	370,9028
	117,7311	302,1160	349,8836	414,0483	377,7435	320,8206	767,8716	284,2874
	169,0960	275,2433	492,6603	402,6335	372,2868	212,9642	416,8930	326,3657
	254,6627	443,6179	531,3421	399,3461	365,4177	288,6781	156,9521	456,1476
	703,3212	190,9491	378,4911	228,3503	572,3606	371,5880	363,3420	448,7183
	696,7023	417,1725	469,4356	457,4949	368,5879	358,5457	291,3097	301,0986
	270,9617	453,5757	330,2656	301,8057	657,6075	378,5506	604,3706	389,1713
	335,0250	293,1663	522,4874	466,1513	582,7829	433,5539	47,9979	227,6864
	144,5709	452,9273	607,5562	483,2600	289,8441	392,3103	202,0681	286,5357
	478,3603	423,8497	394,8433	457,3057	370,6349	387,3005	569,9494	337,1937
	559,1665	462,8223	602,7086	515,0232	332,6324	421,4443	513,7309	469,4460
	376,7386	354,1218	325,2509	288,7605	196,6918	327,9245	586,3532	437,5155
	207,7871	398,2072	430,0021	316,3606	425,7960	268,4459	480,0369	412,2219
	198,5158	422,3408	369,5782	405,4487	539,5118	156,6101	16,4529	410,4769
	364,0460	359,6894	576,7426	350,5135	477,1678	332,6704	635,3741	376,8749
	176,1975	309,3871	413,4892	263,7664	472,4828	214,2469	407,7534	270,2241
	202,8882	418,0226	452,1036	473,6408	511,5735	371,3880	131,6256	336,6328
	350,5694	340,2996	638,9316	489,3689	221,0278	318,6176	184,8326	335,4435
	381,5673	294,1435	512,6169	423,9104	182,4283	561,6746	622,9660	481,1414
	515,6032	241,8058	257,5640	360,2354	405,4838	395,3283	557,7802	397,1881
	516,7260	274,5230	316,4415	249,5581	285,7102	411,6345	289,1066	375,3474
	375,1032	367,6531	342,7146	499,3711	407,0978	342,7637	577,4400	406,0113
	144,2641	382,8679	558,9956	348,8093	409,8395	360,6627	626,8231	416,5046
	691,3298	379,6421	438,0856	392,3634	505,9041	325,4449	87,5147	257,8527
	134,2663	380,4949	403,0642	328,9836	354,2117	420,4992	399,0183	351,4791
	434,9031	315,4289	536,8511	459,1087	234,7554	338,5889	476,4030	282,1963
	405,3272	302,0073	474,2068	387,4593	613,9421	364,6673	687,2534	381,2282
	206,1655	310,5962	518,6319	301,9640	305,1747	397,4866	703,4885	340,0131
	121,6793	273,9884	258,8799	440,9052	309,7596	354,2222	310,4358	580,1579
	337,5234	440,9159	270,4022	312,2586	274,0891	429,6736	236,6168	342,5189
	450,9144	160,4583	385,3636	356,8654	675,9519	281,4157	125,9696	189,0445
	729,0623	349,4971	372,8693	313,8000	515,5797	292,5116	120,6217	408,7570
	589,2998	317,3912	608,0789	309,3215	330,5091	414,9686	588,1879	400,8119
Promedio	380,0190	343,9098	420,1106	372,3678	416,5978	355,0922	403,3858	371,0438
Desviación	184,6680	73,7763	111,2350	74,6406	144,0564	71,4076	209,0305	76,3034

Tabla 8. (Continuación)

40 PUNTOS MARGIN= 2 SLOPE= 70	T=50		T=55		T=60	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	476,3473	299,2603	556,9182	337,4401	417,6361	451,0231
	468,2418	133,8703	260,1313	271,3602	528,5573	392,7205
	336,1001	505,6086	333,4087	478,1835	375,9640	493,5226
	560,5260	324,3764	549,4037	475,0724	486,9088	443,5321
	297,6836	557,3598	361,4468	418,6171	248,7922	442,4520
	340,6168	336,1469	339,3049	382,8572	215,2736	437,6352
	517,4422	416,7285	391,0499	471,1040	196,6464	378,2949
	263,0661	610,5680	235,6488	567,4945	426,3431	402,4870
	407,6556	382,4074	384,6697	366,4419	512,7924	406,5613
	341,6836	321,7619	336,7050	475,9586	410,2939	338,6223
	542,6712	262,3788	180,4238	551,7402	369,2995	457,4650
	109,9664	364,5120	402,6309	293,6776	459,0949	429,1733
	345,0518	596,2693	495,9761	422,6165	700,2467	445,4568
	295,4668	335,5311	425,2592	473,0518	364,3026	333,8981
	373,4813	336,5412	399,2705	419,2646	160,3159	526,3623
	520,6540	274,2804	431,6612	486,3250	329,6785	438,8630
	331,9060	285,2515	413,0193	571,1843	243,0135	473,8177
	317,4314	294,7310	438,2311	508,6123	809,8123	388,8266
	448,7598	493,6545	435,2589	419,6091	235,3633	359,1376
	557,5429	337,0482	348,0932	387,5106	357,8220	494,1004
	440,0779	297,1131	408,4528	387,5978	337,1335	390,8532
	461,8823	285,2454	492,4677	444,5799	440,2645	410,4874
	439,7666	331,1368	453,3225	396,4974	200,9645	448,3923
	294,9350	300,8034	404,2384	357,8170	449,2906	414,2495
	468,9590	528,2367	428,8282	431,9616	501,1139	507,0807
	395,3779	393,4893	486,5043	399,3555	300,6259	346,8822
	185,9595	641,4827	239,1900	625,3869	475,3062	428,0474
	413,4411	231,2974	247,5692	347,2705	493,8743	399,8706
	468,4530	409,8782	410,4663	489,2074	688,6595	563,6377
	353,4106	234,5004	404,7284	398,7101	235,2467	302,1340
	259,4251	352,1941	301,8355	453,6811	494,3563	514,1676
	302,5537	279,4537	325,2221	518,0494	369,4377	293,7338
	454,6318	521,7457	234,9720	384,4215	505,4572	380,0849
	516,5088	327,9947	363,2595	291,8692	490,8103	491,0085
	380,4877	424,5353	393,7375	367,9711	413,0666	559,6191
	521,1067	231,4312	440,5464	415,3780	505,0996	382,7500
	356,0268	240,8153	547,6638	406,2894	472,5237	461,7787
	383,2352	555,8321	415,0791	435,1082	291,9010	395,5062
	551,7174	314,9461	333,2355	406,7646	401,0837	502,7319
	592,4229	460,0436	576,9849	455,3907	435,7798	333,9722
	206,5450	323,2417	443,9329	399,3821	360,8367	247,8298
	187,1064	169,4116	499,8154	491,9575	217,5654	294,2612
	250,2717	421,8575	442,1748	506,4714	679,2941	522,1128
	540,4642	321,5764	411,9662	478,3752	192,3033	228,2627
	473,2880	315,7060	399,3125	408,8388	553,9245	165,3832
	415,4892	489,9922	325,4328	432,0717	511,4880	271,1283
	454,5780	507,9246	377,0880	407,0149	361,0471	333,4996
	517,7209	363,2113	511,4415	405,6038	571,4410	317,4453
	471,2475	496,0291	567,1034	454,4181	506,4772	441,5427
	429,7396	520,5915	410,8030	469,0815	298,7807	344,7182
Promedio	400,7825	375,2001	400,3177	432,8929	412,0662	404,5425
Desviación	112,0086	117,7791	90,8884	70,5883	143,2258	85,9582

Tabla 8. (Continuación)

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE=128	T=10		T=15		T=20		T=25	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	598,5627	789,1119	241,3740	482,2602	100,0930	266,6784	350,9633	40,7011
	504,9917	760,5690	388,1397	679,6170	157,4653	361,6406	194,9556	216,8048
	506,2511	918,9609	408,0488	596,8604	144,2585	312,3314	212,8144	179,8484
	601,2107	792,3934	389,8342	503,4454	183,5606	220,9682	155,8549	190,5648
	612,3188	841,5475	419,9795	550,4583	276,6921	223,4901	237,3226	278,7160
	625,1183	884,3756	587,1824	537,2031	235,1176	171,1791	271,9917	98,9237
	692,5514	733,9407	299,9844	607,9880	290,9963	142,9914	233,7486	74,8622
	708,7975	997,5134	436,9575	447,5616	224,0958	151,4941	249,3800	150,5293
	742,7462	822,4077	367,0816	601,2871	212,5599	107,7864	323,2557	126,2401
	799,8190	825,7494	259,1771	674,0269	229,8112	144,4504	254,7229	194,9613
	753,9660	828,6942	488,2494	568,8922	262,7516	168,2986	323,6770	126,7704
	808,2580	752,2733	494,2181	611,5514	340,3498	158,8226	169,8195	279,7049
	811,6986	832,5691	234,3105	560,2065	263,0818	151,0190	185,1297	177,8681
	828,8560	862,0756	514,6021	435,6197	230,5379	149,2058	251,1789	120,5855
	861,9698	932,9123	267,4486	618,2591	154,9099	105,3501	225,5400	296,0348
	939,9951	816,5987	401,7719	467,4643	270,4718	143,6114	185,7703	222,7589
	862,0724	863,6527	263,2556	466,4621	304,1617	194,6028	166,3255	196,7497
	885,1547	872,6566	537,8203	453,1312	140,9361	126,9925	279,2588	231,5771
	843,0919	878,8886	297,8619	594,0536	234,9730	81,8492	158,7934	109,5043
	901,5000	780,9429	398,6147	614,7111	190,6710	217,5731	220,5378	282,3715
	1088,0825	879,0429	405,1210	523,9662	209,6957	298,6013	246,7190	214,8481
	833,4149	824,8846	601,1026	341,1191	201,1584	223,5289	252,8842	39,1788
	904,4584	851,0534	227,5793	629,4802	300,7776	304,9609	242,6633	308,4199
	849,9211	748,3638	527,0958	656,4630	192,7699	292,1254	175,4950	305,9702
	923,3220	846,1596	250,0334	606,9085	196,5936	293,8733	200,4194	187,1586
	1087,6971	905,4925	453,0797	558,1138	167,8746	291,3860	162,0906	141,6838
	887,0034	777,7531	267,1103	654,9938	237,0849	368,6025	252,7776	362,7438
	857,9359	841,3591	392,6656	502,3791	167,9013	242,9405	202,1574	168,2740
	876,3911	822,4707	236,2567	536,2636	180,1297	98,0825	179,9796	192,0844
	853,7043	843,8978	410,4159	511,6706	129,4836	123,8947	185,3178	86,1400
	1076,4660	850,3050	504,5300	558,2520	190,8544	183,9091	229,0658	98,6591
	764,4676	858,0885	339,2136	532,5496	259,0946	123,3505	171,7151	52,7579
	891,2487	797,6691	399,9287	503,5365	132,3081	126,2526	174,5349	223,8009
	840,1458	860,7882	424,0323	587,3830	174,8981	151,6941	244,5200	152,2405
	869,9754	751,7772	255,7291	603,0760	270,3730	133,7767	187,1573	38,2752
	804,2293	791,4871	318,9535	683,2714	246,5456	205,3088	257,4728	224,8043
	809,4862	771,4825	492,0245	559,5210	119,6521	149,9881	203,6071	181,3294
	876,2700	844,3341	352,9172	544,1095	210,6042	144,7541	173,4019	80,2680
	832,7032	842,6310	315,9490	706,0824	214,8699	160,0765	174,6637	344,5107
	827,5070	845,2506	499,0689	570,3766	189,3749	170,0079	185,1066	42,2056
	805,1360	842,4903	309,6381	602,7854	167,2660	72,0802	210,5982	106,3991
	1088,5322	774,1972	428,2872	628,9149	196,2040	173,4055	266,1305	319,1828
	824,6249	798,3751	270,1828	465,7122	193,2826	88,4744	190,5867	95,3715
	733,8285	870,3204	250,8540	431,6885	177,2650	227,1610	267,2556	278,8628
	901,1379	763,1669	449,0034	479,2543	220,9322	338,2198	115,3317	182,8015
	724,1908	828,9211	453,9801	557,4358	275,7075	265,2823	249,4806	101,3847
	734,7713	811,6431	464,1909	496,2798	101,6456	345,4442	208,1090	16,0508
	752,7584	822,4870	395,6012	516,9297	163,2444	294,0135	233,2656	151,4530
	727,7479	787,0279	467,9603	581,3138	266,8626	234,2579	232,7412	91,8033
	940,6644	794,3089	434,4526	546,2181	135,8864	271,3884	183,9298	206,2055
Promedio	817,5350	828,7012	385,8574	554,9422	206,7567	199,9435	218,2044	171,8189
Desviación	129,9918	51,3277	100,6006	75,2727	55,4124	79,7044	47,1482	88,5190

Tabla 9. Energía mecánica [(% de torque)(grados / segundo)], funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 128. Horas de compilación = 30

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE=128	T=30		T=35		T=40		T=45	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	314,7949	344,4999	311,5240	173,6674	247,2114	405,8338	189,8903	358,5302
	240,4299	325,1947	209,2714	284,6696	276,1072	171,5248	216,3574	286,6766
	262,9752	254,9586	123,7712	292,8836	316,6254	170,2038	122,0842	198,6848
	242,4788	323,7419	285,9552	152,0504	240,0248	319,9731	301,9521	348,5274
	260,6831	262,7622	355,1969	290,7319	307,1882	181,7124	387,1834	364,4355
	379,9353	256,0018	353,8579	192,4153	357,7168	396,8224	127,4315	382,3251
	336,1230	234,7334	232,9237	247,2921	294,5579	198,0326	128,5751	228,7145
	358,9455	381,8662	249,9241	253,6219	253,4633	319,8529	209,7815	249,5563
	308,0153	245,1687	247,7095	199,0302	305,4533	213,3936	404,4919	289,0280
	283,7516	262,2840	327,9647	228,5317	324,7078	88,1141	227,9869	183,5079
	249,2905	311,3755	242,1100	267,6182	255,1328	396,8659	212,1548	139,2999
	258,7130	317,1604	276,1496	140,7136	239,5571	205,6731	278,4494	284,8463
	402,7962	275,1834	221,3127	260,0124	291,4714	303,9713	194,8808	291,8707
	279,3370	228,2205	252,2232	355,2605	232,9522	358,8790	245,0868	257,4554
	188,6733	295,3076	237,0516	339,1546	315,3311	291,5189	237,7760	241,8313
	345,0564	308,4419	269,6753	228,9426	255,6607	390,6652	124,8551	153,7671
	191,6577	346,7883	294,7970	331,8644	154,5509	312,4718	315,1998	312,4454
	248,7841	299,8134	279,9279	308,4439	255,8371	103,8003	115,8998	248,1112
	214,2048	236,4924	237,2749	225,8930	226,5097	279,1428	293,1323	301,6120
	257,3651	216,0625	212,8247	211,2016	306,1384	170,7586	285,6786	268,0795
	249,1502	210,9991	286,2130	178,1444	264,9362	409,8692	226,4176	158,4342
	371,4233	302,4224	275,4046	317,4345	313,6261	185,5750	225,5786	315,2477
	358,9551	175,2595	289,5625	214,0561	266,3122	342,3441	236,5918	106,6759
	275,0836	311,2587	295,0774	338,9590	302,5024	304,4590	400,4752	394,0198
	184,3011	378,8192	253,6756	212,0197	219,8129	380,3922	208,5734	207,5644
	309,1930	380,3403	244,1320	306,6809	326,7807	162,0230	195,2917	295,5494
	328,7089	368,1300	289,7067	167,2994	194,1995	144,4467	351,9600	145,4665
	265,8301	334,1863	257,2811	130,8896	255,8000	377,9868	191,7329	344,0445
	423,5282	248,3435	292,0643	390,8798	239,2446	196,6558	374,7106	154,3227
	272,8321	384,3042	238,0142	214,4249	284,5193	167,1710	233,6885	302,8152
	293,2930	184,6038	240,6673	178,0483	341,3872	223,1435	304,2103	286,3433
	267,6220	228,0329	259,4369	294,8052	241,8827	196,6269	328,5214	267,6599
	423,0649	195,4492	311,1323	229,6961	337,5012	131,6832	381,1613	288,2819
	207,4215	281,9149	239,0819	150,8156	306,7804	289,3570	397,2085	200,0996
	323,9249	293,3041	361,2813	261,8034	304,7514	72,4203	148,2114	314,3371
	361,9221	363,2364	248,2637	184,6085	195,9876	172,4516	257,8871	210,4335
	153,3358	288,9243	266,0270	235,3488	307,2350	282,0640	224,3830	403,1137
	329,2884	290,3179	368,4244	190,1086	266,7852	220,1870	342,5220	231,6791
	331,5100	391,4425	226,9011	207,1635	229,1331	288,3556	278,8380	284,9885
	193,3164	148,5000	320,6415	173,6440	253,1150	477,1608	243,1118	237,5742
	196,8121	341,7211	236,1905	318,5440	281,1848	217,2149	130,8017	328,5218
	236,9306	193,2370	275,9915	238,2121	197,4048	393,1795	266,3070	168,0190
	408,3899	162,9861	321,7582	134,7867	270,3964	247,5944	264,2625	313,7555
	300,2802	355,7789	340,4852	158,3284	259,6493	281,9486	337,7177	230,3100
	161,2233	269,2013	271,0970	188,7269	286,2807	233,9697	288,4441	282,2286
	232,4935	267,8282	241,1010	323,0102	246,2260	117,1254	137,1678	207,3175
	296,7011	354,1967	322,2695	338,4157	217,2802	197,7794	232,3464	115,4044
	392,2933	409,5839	296,4784	106,2286	226,9330	376,9959	399,1605	333,9125
	318,5907	208,8060	225,6137	253,8374	249,0057	316,0085	323,4631	160,0062
	353,6189	220,3087	228,1262	245,8835	261,1535	179,6518	344,3028	276,4531
Promedio	288,9010	285,3899	270,8709	237,3361	268,0801	257,3010	257,8779	259,0777
Desviación	69,6501	66,4885	46,1246	67,8645	42,5661	98,5725	83,5395	74,2264

Tabla 9. (Continuación)

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE=128	T=50		T=55		T=60	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	312,3511	189,5331	296,1888	249,1665	233,9562	148,0217
265,5854	315,2977	379,0381	220,3497	343,4870	335,4528	
342,8672	358,1730	271,7081	331,6594	330,9280	270,9229	
361,6666	345,2193	234,6807	389,8162	229,7362	240,1934	
362,2305	266,5342	198,2168	281,7365	271,4308	314,5086	
298,7339	275,6930	140,9258	240,2762	238,3923	177,5195	
259,2654	176,7494	225,1449	272,1065	245,7025	231,3978	
308,0795	274,2440	335,0593	368,6495	226,2327	315,3524	
349,6861	425,7649	328,4592	360,6634	202,7707	268,8892	
256,5852	141,4185	308,3133	262,6434	219,9357	269,5759	
262,8614	254,5662	362,6339	270,4230	260,3863	136,2782	
259,7990	295,2692	193,3968	284,1542	217,2427	264,0079	
350,0895	339,8145	196,8527	344,3433	341,6647	165,3058	
223,4828	292,1573	150,5601	315,0629	246,1994	251,3626	
242,5617	298,1521	205,8744	195,9104	342,1778	247,4473	
293,6667	249,5879	200,4125	167,5881	260,4032	206,2770	
260,8550	308,6448	217,4895	348,7554	331,4930	213,3911	
365,3465	208,9707	216,0720	115,8595	193,3594	235,3382	
244,3015	223,2900	251,2789	381,7842	279,6071	327,7379	
237,4994	318,1915	230,3847	368,0112	220,2669	313,6352	
178,1765	195,5275	295,7220	467,9999	279,3418	171,7509	
347,2634	418,4341	197,2284	240,6941	364,6174	232,7242	
373,8010	258,2786	362,7848	432,7929	247,5576	313,0283	
285,8823	351,4249	270,9121	379,2855	97,6470	133,7405	
258,9729	215,7741	234,9630	280,5833	310,9238	237,6689	
318,3072	346,4703	299,1696	296,1485	235,1011	172,0196	
261,3790	152,6182	292,1767	264,5597	314,8542	312,7312	
314,8513	352,5015	220,9577	223,6182	279,9090	379,5293	
397,9887	310,0305	264,2063	246,2588	275,4660	149,9359	
267,8664	301,0672	234,0496	256,1301	259,4126	258,1754	
270,1381	215,2212	176,6852	328,7843	329,6749	290,6935	
201,2768	324,6708	300,5177	235,3869	338,5604	78,2515	
172,6046	321,8501	274,0224	318,8581	296,0073	148,7120	
363,9235	363,9837	308,1454	339,0997	306,9877	226,2028	
408,6258	323,0669	332,9829	255,7872	274,8530	303,1016	
279,4365	137,5254	131,1806	301,2039	293,5630	248,6624	
348,8411	398,5351	237,0051	343,0960	355,5950	316,3237	
162,4361	286,4820	222,8852	294,6137	295,9921	135,1113	
255,3335	183,9076	230,3263	300,5991	252,6252	260,6729	
238,6762	319,9745	253,5182	191,1893	320,6394	192,0282	
289,6831	234,4050	266,4824	313,6242	311,3289	200,4089	
247,7988	359,1452	277,1038	191,3529	262,4508	265,7954	
421,1999	216,7195	267,9192	257,4735	205,7947	283,3174	
222,5305	323,1642	347,7616	351,6352	243,6604	109,1220	
419,4519	254,8247	276,9536	363,9784	304,0457	167,3437	
288,9875	293,9712	352,7210	147,4249	300,3400	301,0683	
288,8909	258,2909	249,3697	284,1984	293,5115	276,4930	
293,2610	271,1560	161,6499	448,6834	297,5791	193,0047	
380,0847	228,8830	197,2918	293,3066	245,1162	210,3569	
230,2215	389,8351	269,9251	339,2823	291,0079	352,1607	
Promedio	292,9081	283,3002	254,9862	295,1322	274,3907	237,0550
Desviación	63,6661	70,3607	60,0902	74,0756	50,4843	69,1600

Tabla 9. (Continuación)

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE=254	T=10		T=15		T=20		T=25	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	624,8703	932,8963	310,2294	477,3435	262,4184	285,1728	143,2362	102,3026
	789,2039	890,6212	255,3305	346,4457	119,0011	238,3476	128,2883	166,4416
	695,3495	1001,4032	312,9245	378,2478	210,4353	222,8599	114,3637	129,9971
	770,3684	951,4870	363,5167	367,6346	295,9451	193,5121	210,9145	62,6147
	722,3516	896,7982	306,7595	379,5455	178,0279	227,3576	145,8643	213,9842
	784,8244	760,8301	291,2236	401,8241	348,6323	173,9510	212,2905	293,6934
	744,1428	1048,3387	290,3266	402,1226	90,2045	290,6687	198,0130	38,5028
	823,1627	858,2002	275,6533	517,7649	221,3881	176,0452	56,0028	100,9452
	897,0028	994,6264	232,5909	385,7022	267,7360	272,1706	91,1206	230,7910
	830,2860	931,0442	243,8810	437,7406	252,3857	306,5869	158,8028	171,7428
	778,6584	933,2462	282,9986	328,6932	332,2061	242,1729	227,0552	248,9351
	840,4453	864,3397	321,6783	367,5815	302,7209	286,1073	121,4581	174,1502
	842,2560	931,1820	233,1764	297,0125	273,0606	319,0219	101,0651	319,9718
	852,4803	915,3920	397,6679	383,3261	65,9637	213,4740	155,7182	218,8286
	938,5437	927,3708	256,7346	432,1891	333,7291	333,2285	137,3689	264,3712
	796,3338	963,7860	245,5481	472,5167	214,0507	316,3888	198,4945	170,9125
	813,5701	933,0311	291,8556	503,5797	230,0659	371,0407	113,2837	230,4690
	764,6365	938,6576	254,9484	469,3668	338,0491	281,4639	148,7565	128,6803
	847,6877	842,5743	313,2046	447,4406	228,3909	318,6275	198,2976	68,0728
	831,3569	892,4949	368,7161	460,0719	130,5152	325,9575	76,1507	114,9547
	696,8530	832,5731	281,3188	596,8121	318,7492	356,4907	104,8906	191,9906
	801,8312	835,5803	236,2724	475,1862	243,8947	169,1475	39,4918	50,6005
	707,1652	985,1223	261,1082	394,8966	302,2983	201,6021	183,9407	301,2381
	721,8091	870,9879	348,9198	494,2268	220,6077	241,3295	172,6846	166,1674
	836,9606	974,6341	352,4588	495,6142	244,1144	307,0895	104,8955	88,8945
	802,7202	800,4772	226,6316	396,1105	195,2776	168,5519	196,3766	160,4733
	787,1142	897,2905	292,5941	513,5860	193,8924	340,0611	90,3120	179,4720
	650,4917	866,6610	256,0331	259,4284	252,4006	348,2447	99,0119	174,9074
	753,8606	1005,0563	212,7893	316,0431	262,3273	270,4367	127,7289	93,6033
	667,8788	801,7846	251,4564	328,9448	177,7014	309,4227	242,9905	203,2852
	760,2187	935,8168	319,2048	292,9084	274,8261	260,8962	163,5227	151,4057
	764,8293	868,4982	379,0869	219,2695	229,7782	293,7723	216,7350	148,7745
	680,4001	804,3749	217,1452	155,6813	244,6219	299,0112	116,7669	114,9547
	704,7402	854,6306	265,5234	232,8777	238,1808	365,9032	198,5734	132,8962
	707,6910	963,7476	309,9462	159,7672	203,5077	255,7207	195,1929	34,0091
	772,2431	878,6741	323,2919	263,5862	320,8813	354,6534	195,5628	205,7871
	670,2516	893,2839	226,9706	322,2565	197,0888	258,7436	160,8325	361,7756
	719,9061	836,7650	268,9568	223,5130	303,2493	281,1863	212,3986	216,7891
	628,4110	932,6086	262,1309	239,8728	243,5643	228,4135	155,5850	204,8749
	649,6972	646,8533	284,2674	385,7893	234,7154	333,9188	126,3222	159,7919
	677,3571	876,1548	260,2300	237,8762	378,6189	321,0797	136,8547	207,0973
	715,7263	945,2339	266,0909	229,1870	235,2088	263,4224	158,1262	223,7901
	665,8962	866,8038	270,8569	221,3599	177,8962	327,4449	217,8406	188,2266
	669,3367	807,8255	379,7771	221,8514	236,1758	289,0975	213,9411	110,9115
	748,9466	932,5459	217,1309	233,4745	206,1329	364,6880	208,9595	228,3221
	821,4737	772,8134	276,9364	298,1548	330,1534	328,1736	106,0014	211,1477
	706,9900	880,7264	257,7093	231,5923	126,5497	275,2965	188,5876	205,7683
	691,9584	932,2137	351,5694	221,2153	303,7217	269,7374	112,4951	153,8147
	730,3081	946,4869	309,6286	275,4049	337,0729	299,7734	178,9248	193,4936
	674,0926	772,7652	289,3746	324,4355	213,3581	341,6421	113,8874	117,5859
Promedio	751,4938	892,5462	286,0875	350,3415	242,8298	282,3821	153,5196	172,6442
Desviación	72,3757	74,1168	46,3823	107,3618	68,0490	54,9846	48,6325	71,1685

Tabla 10. Energía mecánica [(% de torque)(grados / segundo)], funciones sinusoidal vs polinomial, Margin = 2 / Slope = 254. Horas de compilación = 30

40 PUNTOS MARGIN=2 SLOPE=254	T=50		T=55		T=60	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
	116,7577	126,5933	54,7982	79,0111	159,6179	180,2656
205,0289	203,6845	146,2664	120,1687	113,5383	49,2660	
112,0279	107,4952	82,1387	211,9911	111,8151	272,2817	
128,9862	120,9585	158,4351	165,6994	151,2282	168,0200	
90,4506	243,5443	142,2183	127,2812	160,5882	274,5795	
156,0750	84,8141	121,3123	232,4434	171,6718	90,4634	
76,4039	142,3724	84,8362	122,9261	193,0214	287,4683	
85,8150	227,7589	63,6858	189,8802	162,3957	318,8337	
120,8037	79,5437	206,3750	200,6449	48,0694	200,6670	
138,1880	39,7747	170,2941	128,2525	122,5095	226,5252	
152,5767	189,3891	117,3352	70,1442	118,9536	172,8791	
102,3973	129,9012	114,0161	187,5577	163,7185	58,6319	
175,9950	109,8450	119,5756	199,9552	98,2663	302,2163	
183,5958	243,1772	99,6537	187,1000	144,4310	220,7524	
128,0468	206,0473	97,1468	132,3542	135,5923	258,9564	
117,4399	173,1582	199,3191	254,6490	74,1018	194,3248	
119,7312	250,6939	160,2923	177,4449	112,4398	212,3505	
264,0132	115,8522	118,4498	149,3990	101,5002	153,7023	
33,8610	98,2162	137,7382	86,1747	71,4237	128,2584	
224,6147	232,7341	195,9065	158,7026	235,9133	234,6681	
189,6412	178,1444	43,4379	104,9459	117,5655	144,4062	
63,5958	138,3834	223,7610	76,4577	90,8396	51,8850	
115,5594	75,7189	173,9767	90,4441	145,8427	179,9772	
66,2626	288,6990	89,0829	165,1420	104,8025	229,4332	
164,6639	234,5079	152,3618	138,9543	73,4398	178,0481	
60,6979	95,6898	166,1879	172,5453	146,2518	82,1554	
205,0245	231,7392	209,5909	155,8087	174,4515	195,2984	
131,9161	130,0053	97,1870	126,3979	91,5066	91,9212	
121,3562	147,1130	115,3574	175,3295	115,1399	257,2701	
160,5404	324,8711	142,5557	128,8635	153,6231	93,5267	
42,7039	113,6372	69,6324	148,5828	169,3449	76,1390	
161,9884	76,2355	145,8726	63,2715	87,4760	166,8653	
90,8167	239,4969	178,2116	269,5035	168,9397	179,1397	
48,5220	278,0206	123,5951	243,2771	149,9228	163,1994	
100,7779	64,4335	111,0563	188,0437	113,5383	239,3286	
136,8846	45,6196	117,0248	137,9162	192,6585	162,9954	
150,4887	177,4723	152,7589	106,5137	87,7987	86,0260	
189,8750	126,4615	148,8502	195,3461	136,5778	253,4996	
127,2430	90,3972	148,5851	187,6593	22,6146	198,2691	
207,6634	106,8310	175,1722	107,8320	180,7817	73,1764	
74,4733	100,3334	178,3986	110,8338	148,4623	15,4377	
128,2087	161,4081	145,8739	178,7920	118,9536	291,9966	
124,7825	140,8401	216,5286	114,8877	136,9924	205,0282	
181,6581	185,7384	115,8995	79,8678	155,9119	164,4516	
116,5058	97,9093	126,7476	122,3510	153,3328	185,2249	
90,6954	221,8216	237,8592	171,4685	89,8739	28,4070	
166,5118	188,9800	119,9947	137,7574	141,6609	43,0806	
91,0604	204,7352	64,7422	208,5999	85,3523	42,2073	
147,5324	238,2169	219,8409	75,4706	177,5959	67,9719	
74,7857	245,4561	82,7037	197,3734	183,1908	198,7820	
Promedio	129,3049	161,4894	137,6528	151,2403	131,3048	167,0052
Desviación	49,9725	69,2884	47,1903	50,3722	41,3898	80,7131

Tabla 10. (Continuación)

Teniendo en cuenta las tablas de resultados anteriores se llega a la conclusión de que no se puede inferir una relación que conlleve a obtener un valor aproximado del torque en el instante de muestreo, ya que como se puede apreciar, los valores para cada periodo son muy dispersos y no presentan convergencia o algún tipo de tendencia, además el valor del promedio no aplica y la desviación estándar lo evidencia.

Por lo anterior, no es posible incluir dentro del análisis de consumo de energía el parámetro "Slope" de la tabla de control de Dynamixel.

Las siguientes figuras muestran que la lectura del torque para dos muestras diferentes de un mismo periodo para una señal son incongruentes y descartan en definitiva esta opción.

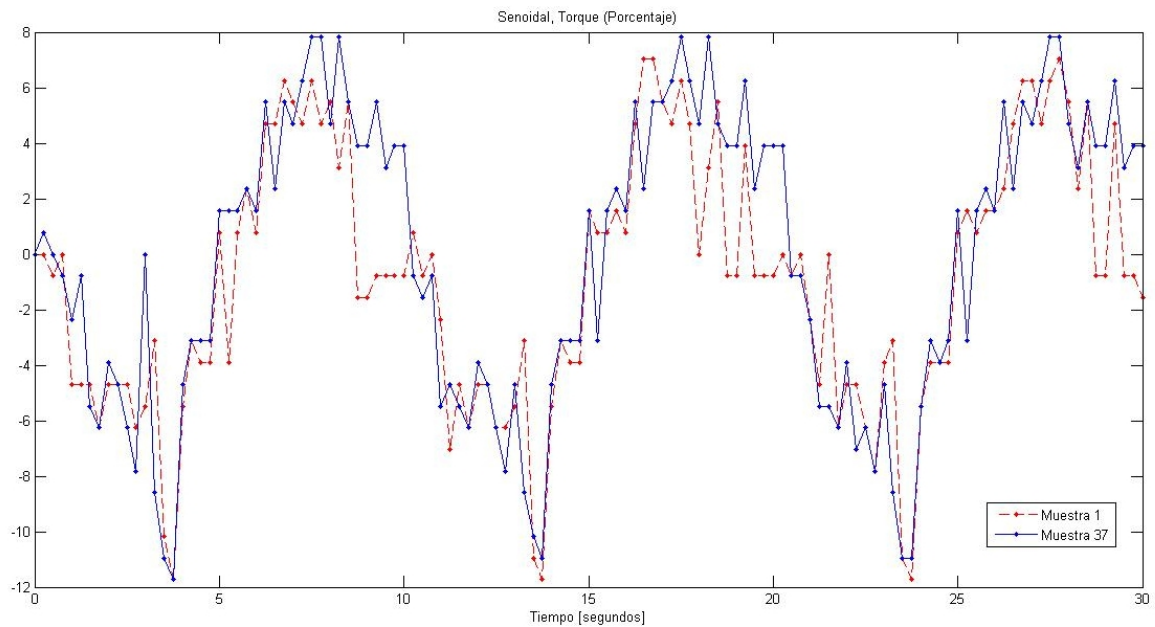


Figura 32. Comparación de Torques, Función Seno Muestra 1 vs Muestra 37, $T = 10$, Margin = 2, Slope = 70

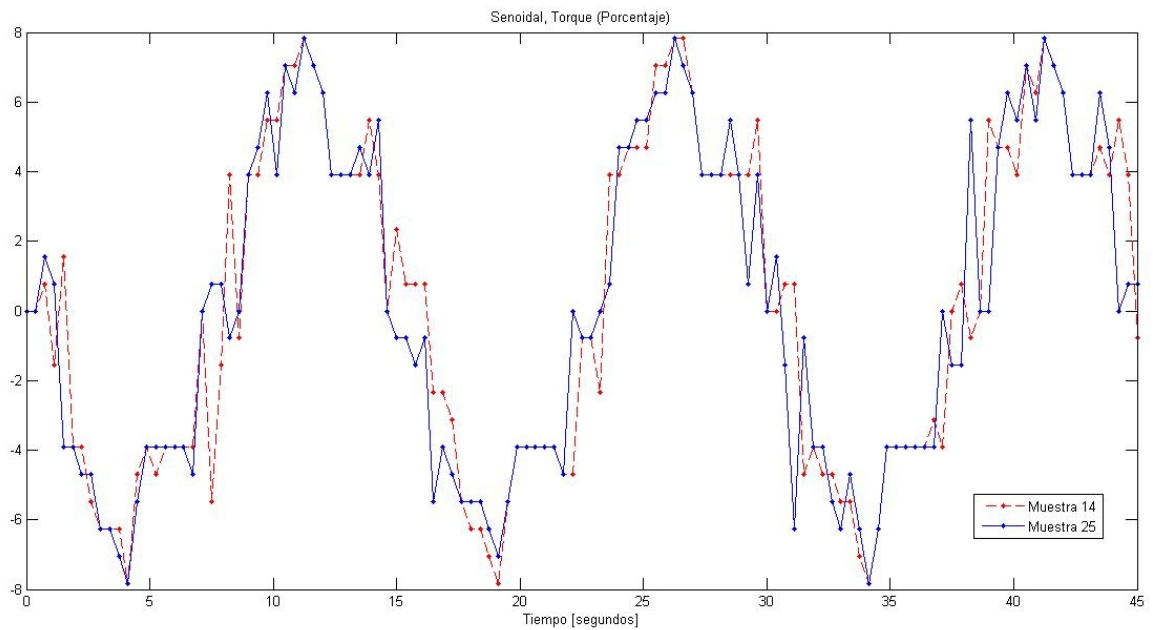


Figura 33. Comparación de Torques, Función Seno Muestra 14 vs Muestra 25, $T = 15$, Margin = 2, Slope = 128

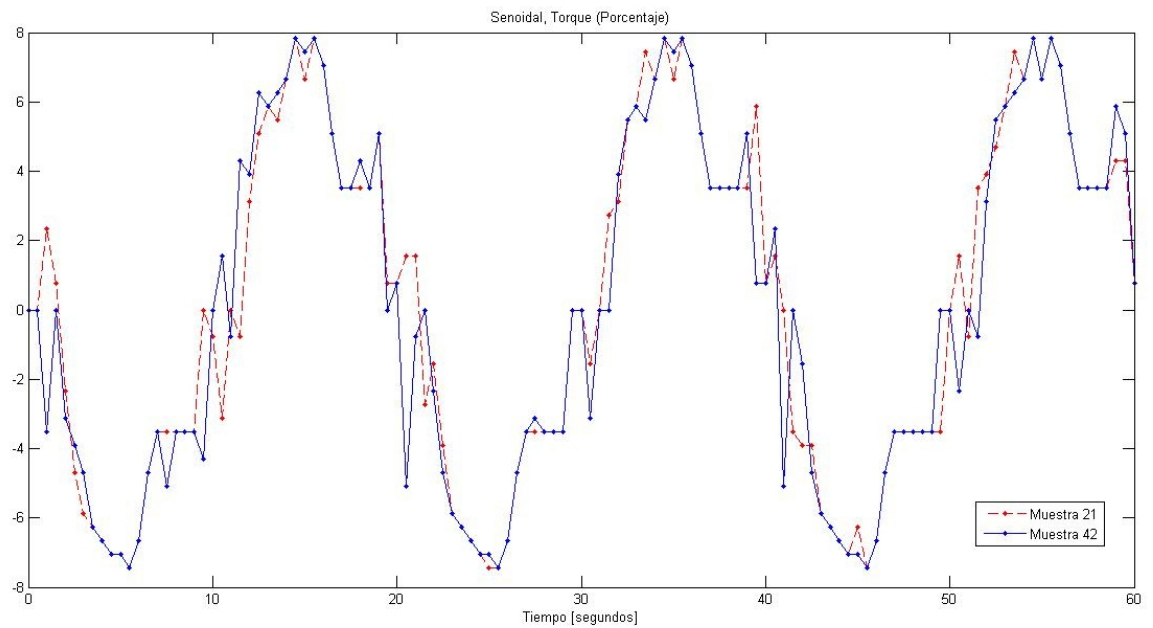


Figura 34. Comparación de Torques, Función Seno Muestra 21 vs Muestra 42, $T = 20$, Margin = 2, Slope = 254

A continuación se presenta un resumen de los resultados de consumo promedio de energía mecánica:

Periodo	SENO		POLINOMIAL	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
10	581,2042	121,7149	659,5639	74,1902
15	340,1761	173,3260	149,7587	112,5853
20	415,8355	121,0891	350,0267	90,7231
25	382,8576	142,6437	347,4199	88,5964
30	380,0190	184,6680	343,9098	73,7763
35	420,1106	111,2350	372,3678	74,6406
40	416,5978	144,0564	355,0922	71,4076
45	403,3858	209,0305	371,0438	76,3034
50	400,7825	112,0086	375,2001	117,7791
55	400,3177	90,8884	432,8929	70,5883
60	412,0662	143,2258	404,5425	85,9582

Tabla 11. Consumo promedio de energía. Margin = 2 / Slope = 70

Periodo	SENO		POLINOMIAL	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
10	817,5350	129,9918	828,7012	51,3277
15	385,8574	100,6006	554,9222	75,2727
20	206,6567	55,4124	199,9435	79,7044
25	218,2044	47,1482	171,8189	88,5190
30	288,9010	69,6501	285,3899	66,4885
35	270,8709	46,1246	237,3361	67,8645
40	268,0801	42,5661	277,3010	98,5725
45	257,8779	83,5395	259,0777	74,2264
50	292,9081	63,6661	283,3002	70,3607
55	254,9862	60,0902	295,1322	74,0756
60	274,3907	50,4843	237,0550	69,1600

Tabla 12. Consumo promedio de energía. Margin = 2 / Slope = 128

Periodo	SENO		POLINOMIAL	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
10	751,4938	72,3757	892,5462	74,1168
15	286,0875	46,3823	350,3415	107,3318
20	242,8298	68,049	282,3821	54,9846
25	153,5196	48,6325	172,6442	71,1685
30	140,2918	54,6686	143,3395	67,3295
35	125,228	43,0333	105,8976	54,6684
40	142,6274	53,7505	136,3271	56,9317
45	146,5286	43,5462	115,6006	46,5244
50	129,3049	49,9725	161,4894	69,2884
55	137,6528	47,1903	151,2405	50,3722
60	131,3048	41,3898	167,0052	80,7131

Tabla 13. Consumo promedio de energía. Margin = 2 / Slope = 254

Por todas las anteriores determinaciones no tiene sentido seguir efectuando el análisis de optimización energética realizando el cálculo a través del valor de porcentaje de carga mecánica, del cual se trató de obtener alguna correlación ya que según la siguiente nota del fabricante era inferido de un valor interno de torque.



Notes: Current load is inferred from the internal torque value, not from Torque sensor etc.

For that reason, it cannot be used to measure weight or torque; however, it must be used only to detect which direction the force works.

Por consiguiente como alternativa, se decide realizar la implementación del sensor para obtener el valor de la corriente eléctrica y calcular la energía eléctrica consumida por trayecto. Esta opción permite generar la precisión adecuada para la comparación de las señales y en consecuencia visualizar el efecto real que resulta de modificar el contenido armónico en la señal de referencia.

3.2 EN TÉRMINOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La experimentación para determinar el consumo de energía eléctrica, partiendo de la corriente eléctrica, se realizó cincuenta veces por periodo para obtener contundencia en la información. Se consideró tomar datos para periodos comprendidos entre 15 y 60 segundos. Además de esto se determinaron, para generar la trayectoria de referencia, 30 puntos por periodo y se hizo finalmente una comparación variando el parámetro "Slope" (pendiente de llegada) para observar el efecto que éste ocasiona en el consumo.

Las siguientes tablas ilustran los resultados de energía media para las diferentes trayectorias (sinusoidal y polinomial) y se calculan el promedio, varianza y desviación estándar respectivamente.

	T=50		T=55		T=60	
	SENO	POLI	SENO	POLI	SENO	POLI
Promedio	201,8437	199,2592	222,9032	226,0151	246,7912	245,2208
Varianza	1,5875	1,4586	1,1149	0,6795	1,8491	1,9324
Desviación	1,2600	1,2077	1,0559	0,8243	1,3598	1,3901
	202,4637	201,0270	223,3609	227,3777	243,9534	245,6797
	202,2060	198,1572	221,8963	225,7983	245,9329	246,0173
	203,1579	200,5686	224,1451	225,3471	249,0335	246,2162
	200,0287	202,7515	221,9603	226,1065	246,5234	244,9197
	204,1038	199,6244	222,7329	226,2599	245,5783	242,6523
	203,8798	200,8575	221,5610	225,6096	244,5994	243,9823
	203,2526	199,2045	223,9233	225,6385	244,5843	246,2309
	201,1120	196,6334	222,8129	225,0996	247,7632	247,4195
	201,5299	198,4389	222,3979	224,7296	246,6242	245,6337
	201,0352	199,5782	222,8196	227,8629	246,4220	246,8847
	202,0291	198,0362	221,5918	227,3870	249,6807	245,7556
	201,2232	200,3995	222,6155	225,9230	245,1893	246,8239
	201,4264	198,9968	224,7711	225,7859	247,2534	242,8145
	200,8439	200,3931	222,8631	226,5541	246,9855	247,1998
	202,2627	197,6920	224,5178	224,9224	246,8180	246,5606
	200,7155	199,7738	222,9197	224,5713	248,3137	247,2972
	201,6396	198,1431	224,7937	224,7591	248,1347	246,3838
	199,8140	201,6808	223,6123	226,9785	248,4999	245,3235
	203,5802	199,1826	223,5393	226,0826	246,7862	245,2713
	202,4404	200,9458	224,7294	225,8790	246,4923	243,9715
	202,0440	198,9286	221,1692	226,8900	248,6455	244,3491
	204,0660	198,6642	222,6225	226,4305	246,6152	243,6432
	202,2914	199,4957	223,2923	224,8120	247,3453	242,7978
	199,8642	198,7209	222,6549	226,0586	245,9884	245,5849
	201,6704	197,8970	223,8477	226,7451	245,6244	244,7677
	200,8074	198,8544	222,8734	225,5744	246,1697	244,8773
	200,6537	197,6039	223,6717	225,5279	247,0565	244,6554
	200,1923	196,6707	224,0117	226,5294	247,7379	245,5443
	200,9475	198,1229	222,0672	225,5487	245,8931	246,6627
	201,6374	198,8317	223,5190	225,2466	246,2072	242,9503
	203,0199	199,7171	221,3292	225,8091	244,4071	246,0583
	200,5949	200,2851	223,5277	227,7866	247,6201	244,2234
	202,2536	199,7245	224,5437	225,8613	247,5442	247,5018
	201,3812	199,9702	221,2724	225,8150	248,3497	245,8973
	201,5769	199,1463	222,1209	225,7469	247,2654	244,5747
	202,9118	198,8271	223,9081	224,6185	246,3364	245,8206
	201,1456	199,0019	221,0817	226,6401	248,8200	246,0581
	200,1954	200,6289	223,5430	225,9994	249,1642	243,1221
	200,2111	198,3373	222,6974	226,8865	247,0967	244,5273
	199,6039	199,3528	221,6311	226,6316	246,4894	246,5881
	201,9666	199,5854	222,5239	227,3224	247,7706	245,7570
	203,4711	197,7620	222,8563	226,1395	244,5635	244,2778
	202,4504	198,7100	222,5998	224,6916	246,3184	247,3721
	201,0636	198,5192	224,7088	225,5474	244,9283	244,3718
	202,0567	198,5130	223,4981	226,1966	248,2046	243,0793
	202,2386	200,4341	222,7924	225,2191	245,9739	246,5849
	203,8928	200,3570	221,1767	226,8696	247,1165	244,6160
	203,0472	199,3829	221,4525	226,2012	246,2774	244,4568
	204,8140	200,0859	222,5548	226,2562	248,0487	242,5217
	201,3698	198,7461	222,0492	226,4825	244,8128	244,7624

Tabla 15. (Continuación)

En la siguiente gráfica se evidencia la precisión del sensor de corriente eléctrica, comparando dos muestras de potencia eléctrica para una misma señal.

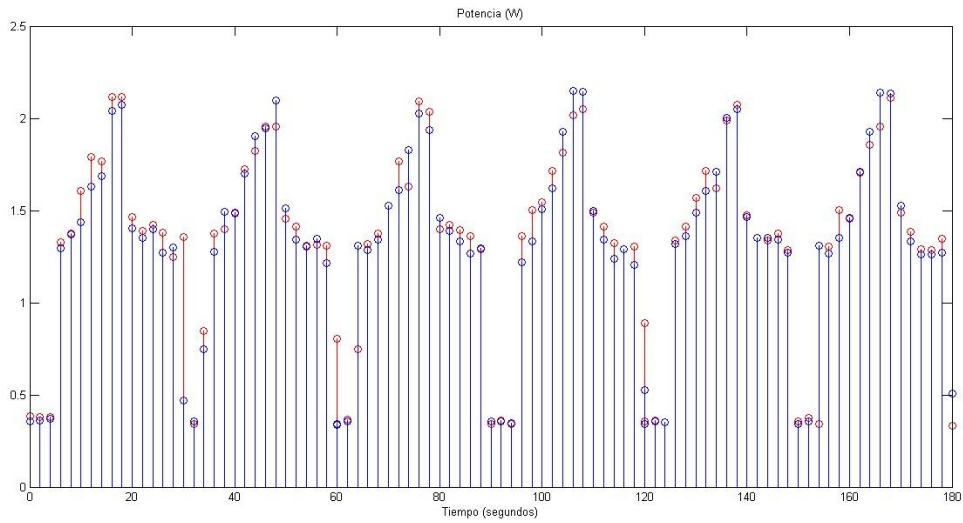


Figura 33. Comparación del consumo de Potencia eléctrica entre dos muestras de una misma señal (Polinomial T = 60)

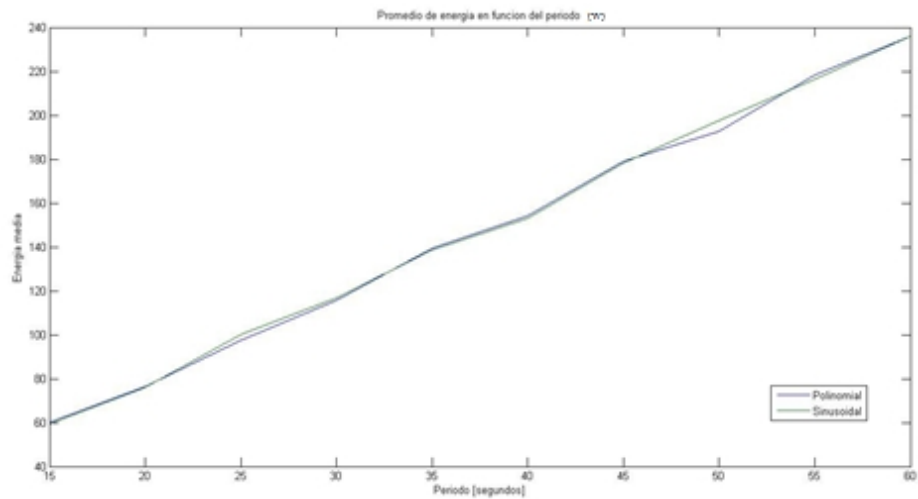


Figura 36. Promedio de energía en función del periodo. Margin 2, Slope 128

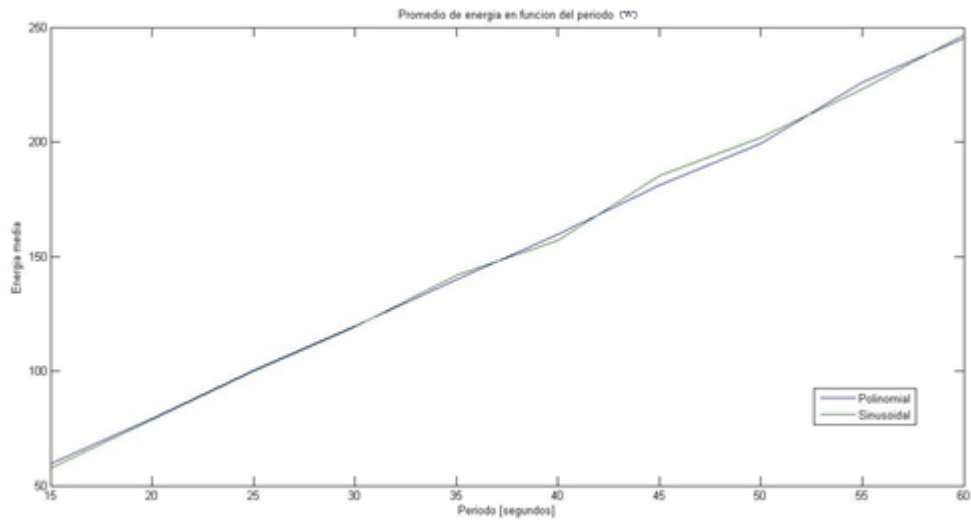


Figura 37. Promedio de energía en función del periodo. Margin 2, Slope 254

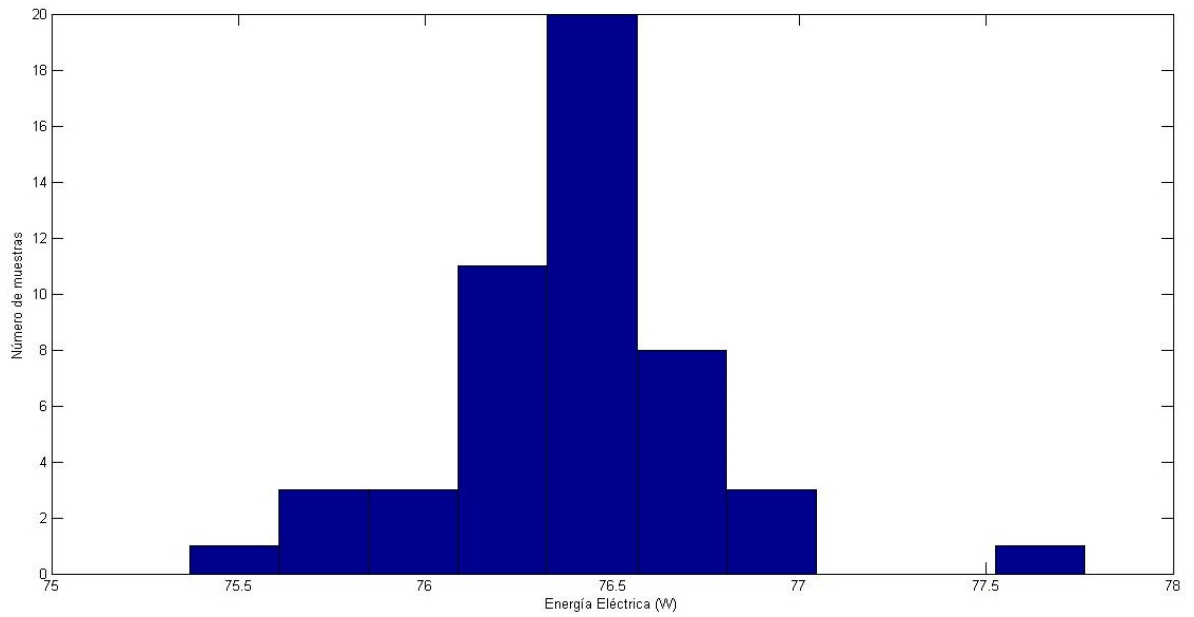


Figura 38. Histograma 50 ensayos, Señal Polinomial, $T = 20$, Margin = 2, Slope = 128

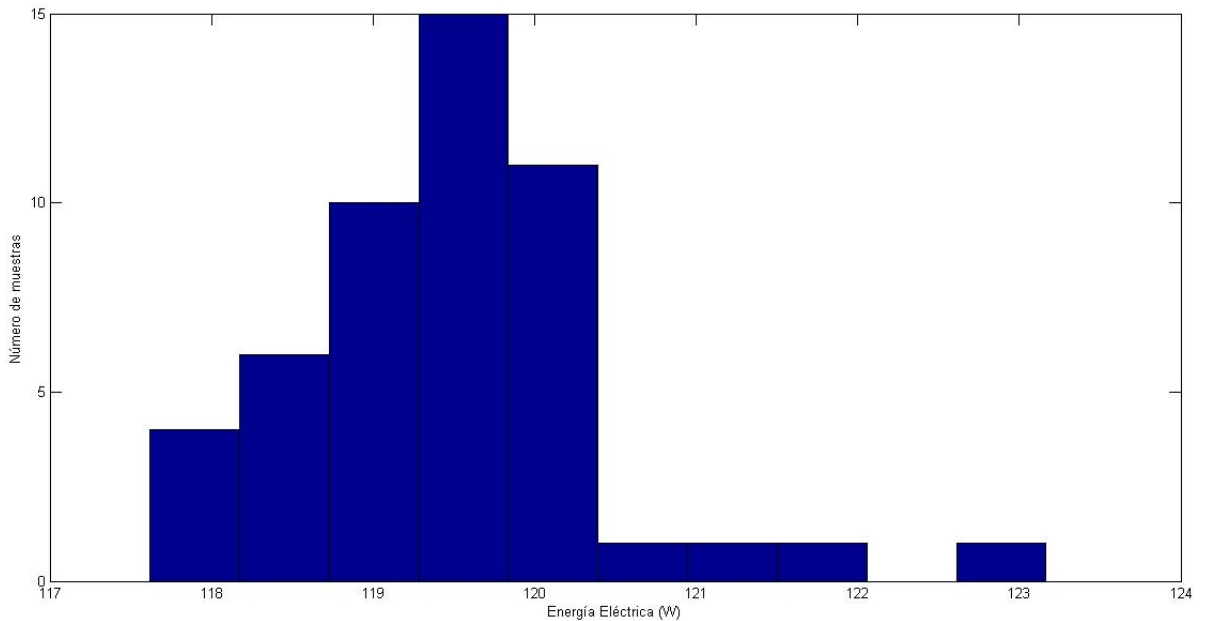


Figura 39. Histograma 50 ensayos, Señal Sinusoidal, $T = 30$, Margin = 2, Slope = 254

Se puede apreciar que los datos de energía calculados a partir de la corriente eléctrica se encuentran en un rango muy pequeño respecto al promedio como se visualiza la tendencia para dos pruebas aleatorias en las figuras 38 y 39, además complementariamente, los valores de la varianza con la desviación estándar brindan un nivel de aceptación suficiente.

En general, se puede observar cierta diferencia entre los datos de la misma referencia arrojados por el experimento, ya que el patrón de vibración es diferente para cada una de las tomas que se puedan realizar respecto a diferentes días. Este componente estocástico puede ser intensificado dependiendo de la velocidad de ejecución del movimiento, así como también en relación con la exigencia en el control que determina la exactitud de la trayectoria, pudiendo generar en este sentido, algún margen de error el cual ocasiona una percepción diferente de la carga para el servomotor, que pueda tener alguna desviación respecto a una toma equivalente y de esta manera él se exige en el torque de forma diferente.

A continuación se realiza un resumen de los resultados expuestos en las tablas 14 y 15:

Periodo	SENO			POLINOMIAL		
	Promedio	Varianza	Desviación	Promedio	Varianza	Desviación
15	59,3856	0,2528	0,5028	59,9555	0,1290	0,3591
20	75,9791	0,1877	0,4332	76,4049	0,1354	0,3680
25	100,1185	0,3957	0,6290	97,6994	0,1894	0,4352
30	116,7005	0,2814	0,5305	115,8313	0,2522	0,5022
35	138,6805	0,6037	0,7770	139,4522	0,4989	0,7063
40	152,9844	0,9751	0,9875	154,1256	0,9775	0,9887
45	178,2472	1,1069	1,0521	178,9784	1,2141	1,1019
50	197,4677	1,6921	1,3008	192,4817	1,6516	1,2852
55	216,4601	1,8935	1,3760	218,1284	1,8452	1,3584
60	235,2168	1,8157	1,3455	235,6286	1,7922	1,3387

Tabla 16. Consumo promedio de energía eléctrica. Margin = 2 / Slope = 128

Periodo	SENO			POLINOMIAL		
	Promedio	Varianza	Desviación	Promedio	Varianza	Desviación
15	57,8207	0,6375	0,7984	59,5761	0,6438	0,8023
20	78,6876	0,3537	0,5947	79,3152	0,1246	0,3530
25	100,1469	0,5336	0,7305	100,2978	0,6693	0,8181
30	119,4339	0,9103	0,9541	119,6309	0,4310	0,6165
35	141,8824	0,9153	0,9567	139,9355	0,5376	0,7332
40	157,0329	1,0985	1,0481	159,6968	0,5929	0,7700
45	185,3468	1,4976	1,2238	181,1101	0,9238	0,9612
50	201,8437	1,5875	1,2600	199,2592	1,4586	1,2077
55	222,9032	1,1149	1,0559	226,0151	0,6795	0,8243
60	246,7912	1,8491	1,3598	245,2208	1,9324	1,3901

Tabla 17. Consumo promedio de energía eléctrica. Margin = 2 / Slope = 254

Teniendo en cuenta las tablas 16 y 17, y después de analizar la diferencia de los promedios entre la señal de referencia tipo sinusoidal y polinomial para cada frecuencia, se concluye que no hay disminución considerable de energía, y por lo tanto se determina que el ancho de banda del controlador del servomotor no es lo suficientemente grande como para amplificar los componentes de alta frecuencia de la señal de referencia y de esta manera generar fluctuaciones de energía entre la fuente y la carga.

Por otra parte, hacer que la pendiente de llegada adquiera valores bajos es perjudicial para el actuador, en casos donde no se requiere desplazar cargas considerables, puesto que se le está aplicando el máximo torque para cada paso de la trayectoria. Por ende, se han estudiado adicionalmente los efectos de este parámetro que no es comúnmente tenido en cuenta.

Por lo tanto, aumentando el parámetro "Slope" se logra suavizar la trayectoria sin influir en el consumo energético como se observa en las figuras 36 y 37, lo que probablemente prolongue la vida útil del actuador.

4. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una plataforma adecuada que soportara un péndulo mecánico, donde se evidenció que el ancho de banda del controlador del servomotor Dynamixel AX-18A no es lo suficientemente grande para, mediante la señal de referencia deseada, introducir dinámicas que estimulen la amplificación de los armónicos de alta frecuencia según el modelo general fisicomatemático expuesto en [2]. Por lo tanto no se logró visualizar una optimización a nivel de consumo energético.

Se demostró que al aumentar el parámetro “Slope”, teniendo en cuenta el requerimiento de la carga, se logra suavizar el movimiento del servomotor sin influir en el consumo energético, lo que puede prolongar la vida útil de éste.

El sensor de carga respecto al torque interno del servomotor, en definitiva, sirve únicamente para indicar la dirección del desplazamiento rotacional o en qué sentido fue ejercido el torque para controlar la posición. Por lo tanto, no se puede inferir a partir de éste, un valor proporcional normalizado de torque para un instante de tiempo.

Se obtuvo que el valor de frecuencia mínimo efectivo de seguimiento del servomotor está condicionado por la siguiente relación: $T/Puntos = 0.5$ segundos, siendo T el periodo de la señal de referencia y “Puntos” indica la cantidad de muestras por Periodo.

Como trabajo futuro se podría analizar este efecto en Servomotores de más gama (posible mayor ancho de banda) tales como RX Series, la Serie Pro de Dynamixel o kits robóticos con múltiples servomotores en línea, ya que el SDK, como integrador para cualquier tipo de aplicación, permite la flexibilidad e independencia del código fuente para ser aplicado o adaptado a cualquiera de estos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Prodanovic, K. De Brabandere, J. Van den Keybus, T. Green, and J. Driessen, "Harmonic and Reactive Power Compensation as Ancillary Services in Inverter-based Distributed Generation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 432 - 438, Mayo 2007.
- [2] C. F. Rengifo, A. Yannick, and K. Bassel, "Reactive Power Compensation in Mechanical Systems," in *The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics*, Stuttgart, Germany, 2012.
- [3] R. Ortega, A. J. Van der Schaft, I. Mareels, and B. M. Maschke, "Putting Energy Back in Control," *IEEE Control Syst. Magazine*, vol. 21, no. 2, pp. 18 - 33, Abril 2001.
- [4] E. García-Canseco, R. Griñó, R. Ortega, M. Salichs, and A. M. Stankovic, "Power-Factor Compensation of Electrical Circuits," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, no. 2, pp. 46 - 59, Abril 2007.
- [5] D. Jeltsema, "Modeling and Control of Nonlinear Networks," Universidad Técnica de Delft, Rotterdam, Holanda, Tesis Doctoral 90-8559-048-5, 2005.
- [6] L. S. Czarnecki, "Energy Flow and Power Phenomena in Electrical Circuits: Illusions and Reality," *Electrical Engineering*, vol. 82, no. 3-4, pp. 119 - 126, Marzo 2000.
- [7] W. M. Grady and R. J. Gilleskie, "Harmonics and How They Relate to Power Factor," in *Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference*, San Diego, CA, 1993, pp. 1 - 8.
- [8] J. J. Slotine, "Putting Physics in Control. The Example of Robotics," *IEEE Control Magazine*, vol. 8, no. 6, pp. 12 - 18, Diciembre 1988.
- [9] H. Nijmeijer and A. J. Van der Schaft, *Nonlinear Dynamical Control Systems*, Verlag, Ed. New York, Estados Unidos: Springer, 1990.
- [10] R. De Carlo and P. Lin, *Linear Circuit Analysis*. Oxford, Reino Unido: Oxford Press, 2001.

- [11] H. Lev-Ari and A. M. Stankovic, "Hilbert Space Techniques for Modeling and Compensation of Reactive Power in Energy Processing Systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 540 - 556, Abril 2003.
- [12] P. Seriktkankul, H. Seki , M. Hikizu, and Y. Kamiya, "The Effects of Negative Driving Torque in Servomotor Drivers," in *International Joint Conference*, Busan, 2006, pp. 876 - 879.
- [13] C. A. Desoer and E. S. Kuh, *Basic Circuit Theory*. New York, Estados Unidos: McGraw–Hill, 1969.
- [14] M. Baliero and G. Pias, "Fútbol de Robots para la Liga Humanoide de RoboCup ," Instituto de Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo , Proyecto de Grado 2012.
- [15] T. Arakawa and T. Fukuda, "Natural Motion Trajectory Generation of Biped Locomotion Robot using Genetic Algorithm through Energy," in *Systems, Man, and Cybernetics, 1996., IEEE International Conference on*, Beijing, 1996, pp. 1495 - 1500.
- [16] R. Ortega, D. Jeltsema, and J. M. Scherpen, "Power shaping: A new paradigm for stabilization of nonlinear RLC circuits," in *In Proc. IFAC LatinoAmerican Control Conference*, Guadalajara, Mexico, 2002.
- [17] R. Ortega, D. Jeltsema, and J. M. Scherpen, "Power shaping: A New Paradigm for Stabilization of Nonlinear RLC Circuits," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 10, pp. 1762 - 1767, Octubre 2003.
- [18] C. L. Fortescue, "Power, Reactive Volt-Amperes, Power Factor," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 52, no. 3, pp. 758 - 762, Septiembre 1933.
- [19] H. Young y R. Freedman, de Física Universitaria, Pearson Education, 2009, pp. 436-437.
- [20] [En línea]. Available: http://2.bp.blogspot.com/-83AtBJQvLzQ/UqhBRQ-m_8l/AAAAAAAAAFo4/TB3ASa79knY/s200/pendulo-simple.jpg. [Último acceso: 20 Agosto 2014].

- [21] [En línea]. Available: <http://elementos.org.es/hierro>. [Último acceso: 19 Agosto 2014].
- [22] R. Corea del Sur. [En línea]. Available: http://www.robotis.com/xe/dynamixel_en#d02. [Último acceso: 19 Agosto 2014].
- [23] R. Corea del Sur, «e-Manual v1.23.00,» [En línea]. Available: http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/ax_series/ax-18f.htm. [Último acceso: 18 Agosto 2014].
- [24] R. Corea del Sur, «e-Manual v1.23.00,» [En línea]. Available: http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.htm. [Último acceso: 19 Agosto 2014].
- [25] R. Corea del Sur, «e-Manual v1.23.00,» [En línea]. Available: http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/communication/dxl_packet.htm. [Último acceso: 21 Agosto 2014].
- [26] N. Y. City, «Adafruit,» [En línea]. Available: <http://www.adafruit.com/product/563>. [Último acceso: 25 Agosto 2014].

ANEXO A

INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN INICIAL PARA LA UTILIZACIÓN DEL SDK DE DYNAMIXEL

El siguiente instructivo es realizado para el uso en la plataforma Microsoft Windows 8 de 64 bits y MATLAB R2012b, de acuerdo a su sistema operativo y su versión de MATLAB, deberá realizar algunos ajustes necesarios para la compatibilidad.

1. Inserte el dispositivo USB2Dynamixel, Windows detectará e instalará automáticamente los controladores.

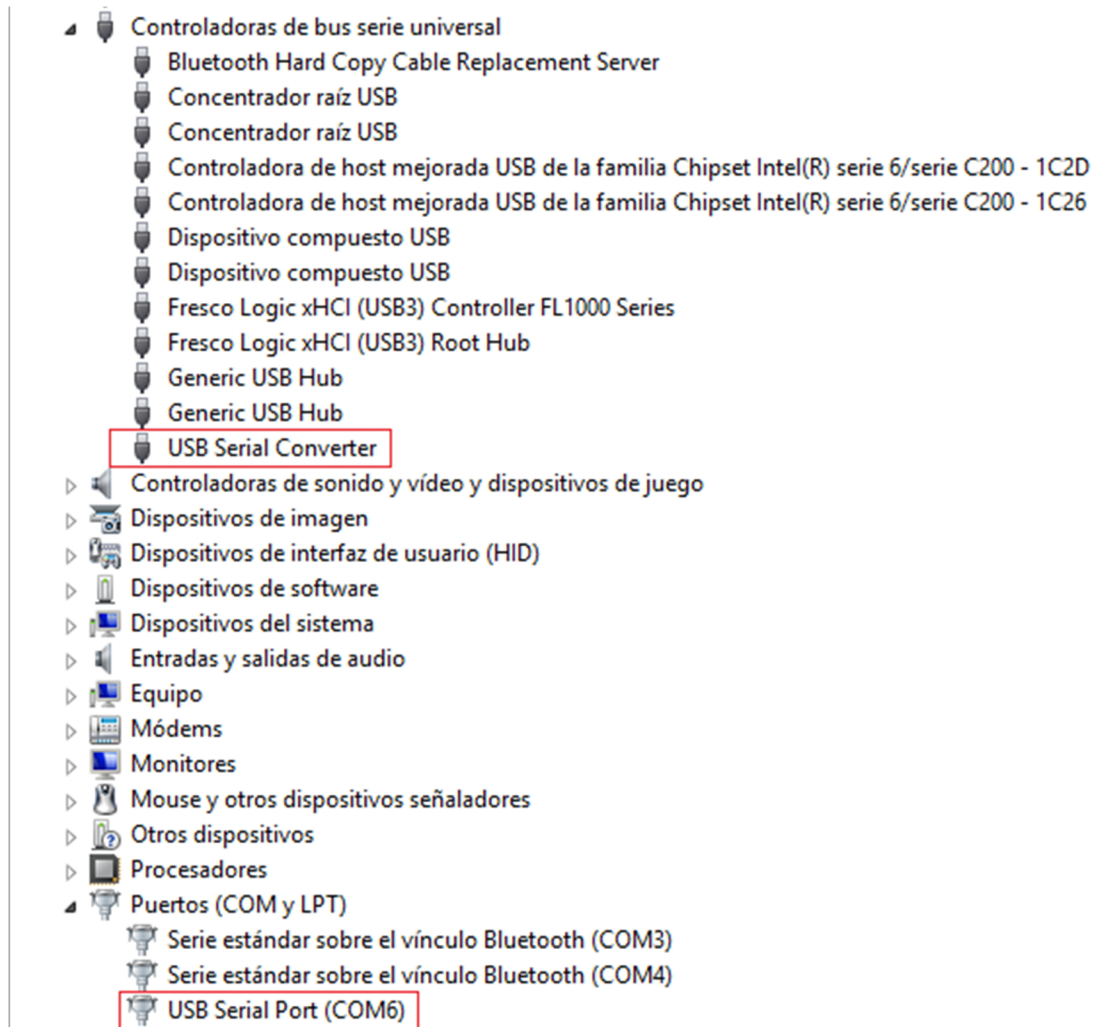


Figura 40. Lista de dispositivos del PC.

2. Proceda a descargar la carpeta SDK de Dynamixel para 64 bits, en la página oficial:

http://support.robotis.com/en/software/dynamixel_sdk/usb2dynamixel/usb2d_xl_windows.htm.

Ubíquela en una ruta de preferencia de su disco duro.

3. Diríjase a Configuración avanzada del sistema / Variables de entorno / Editar variable del sistema Path y anexe la ruta de la carpeta BIN que se encuentra dentro de la carpeta previamente descargada, como se muestra en la siguiente figura:

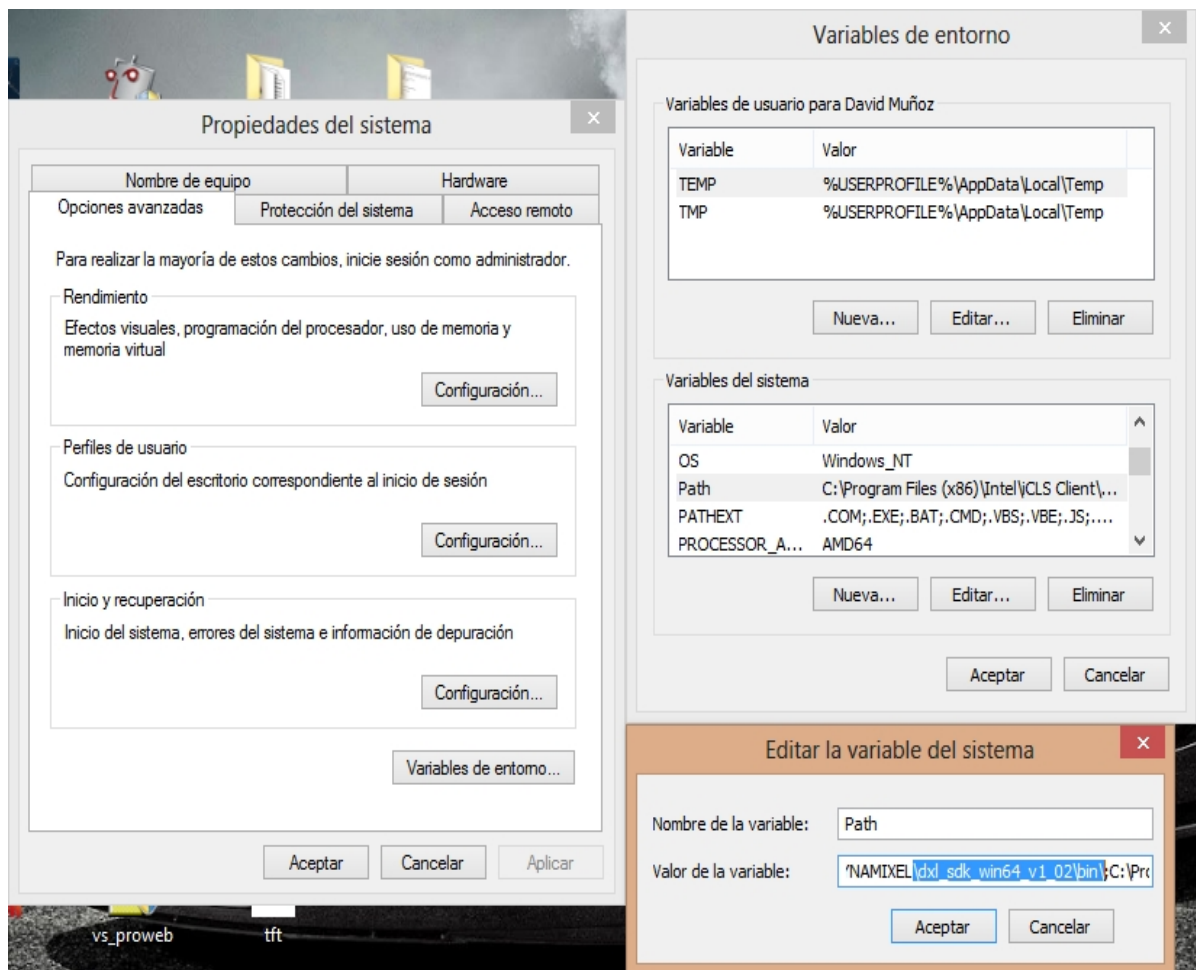


Figura 41. Configuración de variables de entorno del sistema del PC.

Acepte los cambios realizados por cada ítem.

4. Ejecute MATLAB y cargue mediante el Path las carpetas IMPORT y BIN como se muestra a continuación:

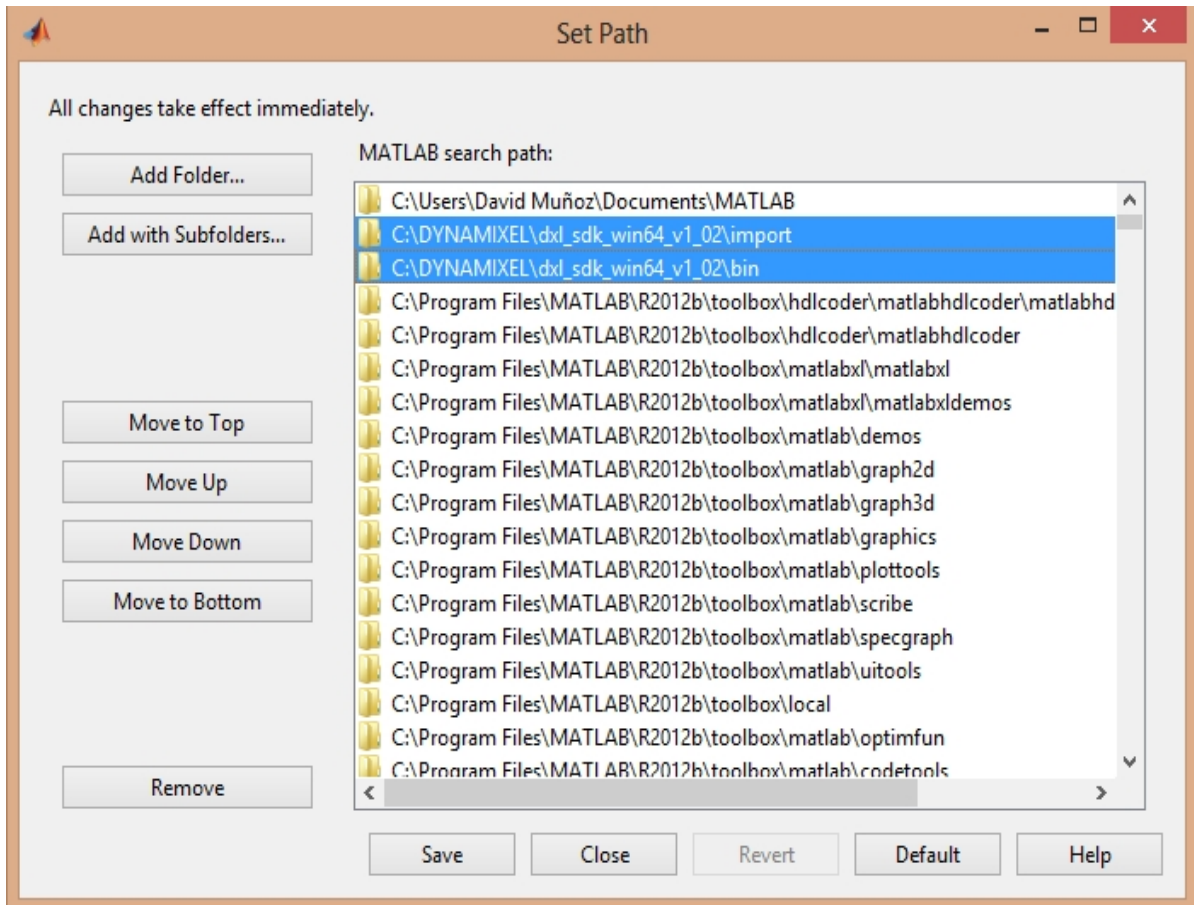


Figura 42. Configuración de paquetes de Matlab.

Guarde los cambios realizados.

El SDK también puede ser cargado en otros programas compatibles con C que puedan utilizar dll dependiendo del tipo de desarrollo deseado, tales como: Visual Basic, Visual C++, Visual C# o LabView.

5. Instale un compilador de C e incorpórelo, ya que MATLAB no lo trae por defecto, para esta versión de MATLAB se sugiere Microsoft Visual C++ 2010 Professional:



Figura 43. Compilador Microsoft Visual C++ 2010 Professional.

6. Cargue la librería en el script y proceda a desarrollar su programa compatible con todo el lenguaje de MATLAB además de las funciones por defecto del SDK de Dynamixel.

ANEXO B

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR DE CORRIENTE ELÉCTRICA PARA UN RANGO DE TRABAJO CONFORME AL CONSUMO DEL SERVOMOTOR

La siguiente información está dedicada a la construcción de un sensor de corriente eléctrica, necesario para la adquisición de datos precisos del consumo energético.

El diseño se fundamenta en tomar de forma indirecta la corriente, sin afectar el desempeño normal del sistema mecánico, de esta manera, se conecta una resistencia en serie con el servomotor como se muestra en la figura 44, con las ventajas de que generará un voltaje irrelevante con respecto al consumido por el servomotor.

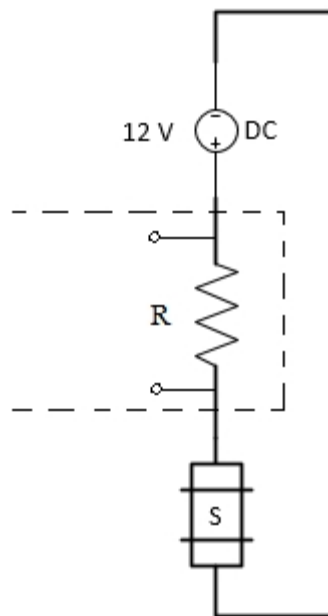


Figura 44. Esquema de la conexión en serie del sensor de corriente.

Para la adquisición de datos se hace uso de la tarjeta Arduino Mega ADK.

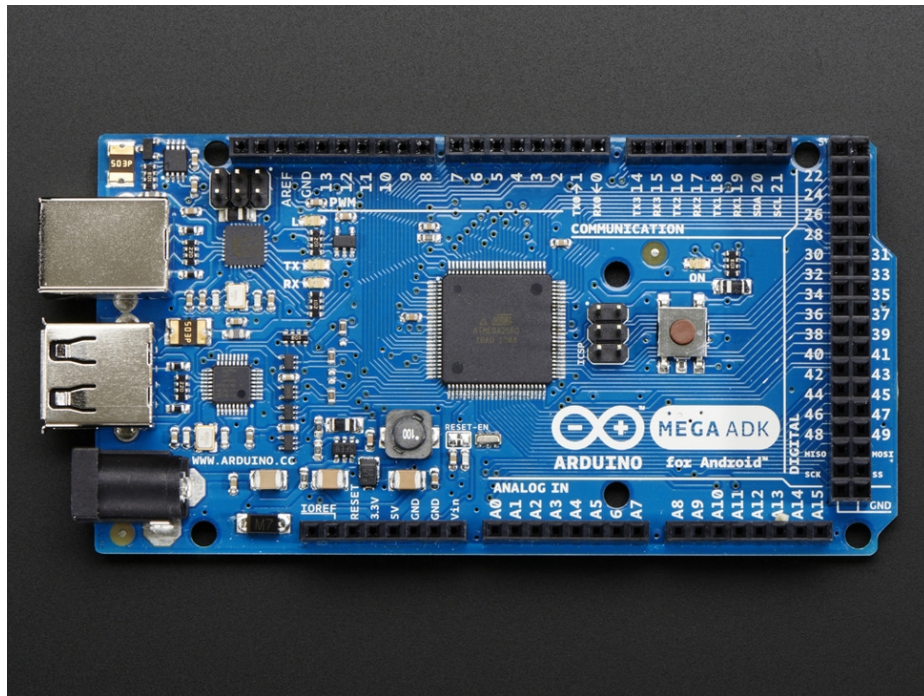


Figura 45. Arduino Mega ADK (Tomada de [26]).

El siguiente circuito se utiliza para la adaptación a la tarjeta Arduino.

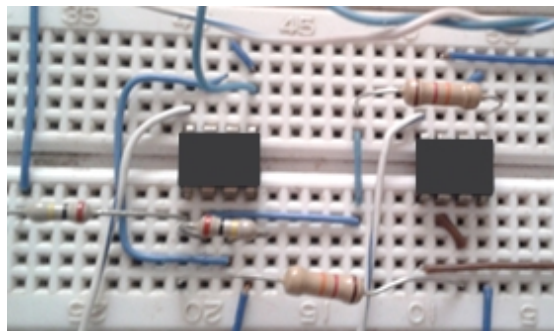


Figura 46. Amplificador de Instrumentación Implementado.

El siguiente diagrama evidencia el funcionamiento general de un amplificador de instrumentación utilizado en el caso de estudio.

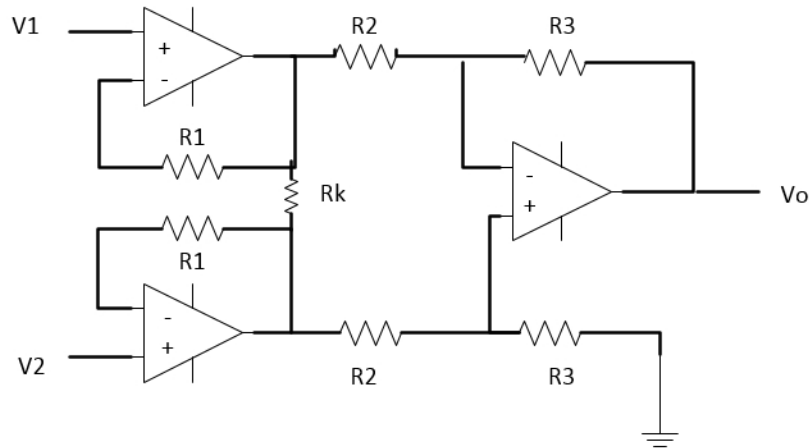


Figura 47. Esquemático del amplificador de instrumentación.

En términos generales, la ganancia total del amplificador de instrumentación será:

$$V_o = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_k}\right) \frac{R_3}{R_2}$$

Teniendo en cuenta que el rango estimado de consumo de corriente para las diferentes trayectorias oscila entre 30 mA y 220 mA, se tiene:

$$R_2 = 12 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 200 \text{ k}\Omega$$

Por lo tanto, la amplificación de la señal es de:

16,67 veces.

De esta forma, la lectura en la entrada analógica obtenida por la tarjeta Arduino está comprendida en el rango de (0, 4.2) V.

Se emplean entradas diferenciales para las etapas de conversión, por ende se usan fuentes de (-9, 9) V.

La siguiente figura, muestra la forma de implementación de la fuente dual. Para esto se requieren dos fuentes independientes conectadas en serie.



Figura 48. Implementación de fuente dual (-9, 9) V.

A continuación se expone la suma de dispositivos que comprenden todo el esquema para la recepción y transmisión de la corriente eléctrica, debidamente puesto en serie con el servomotor.

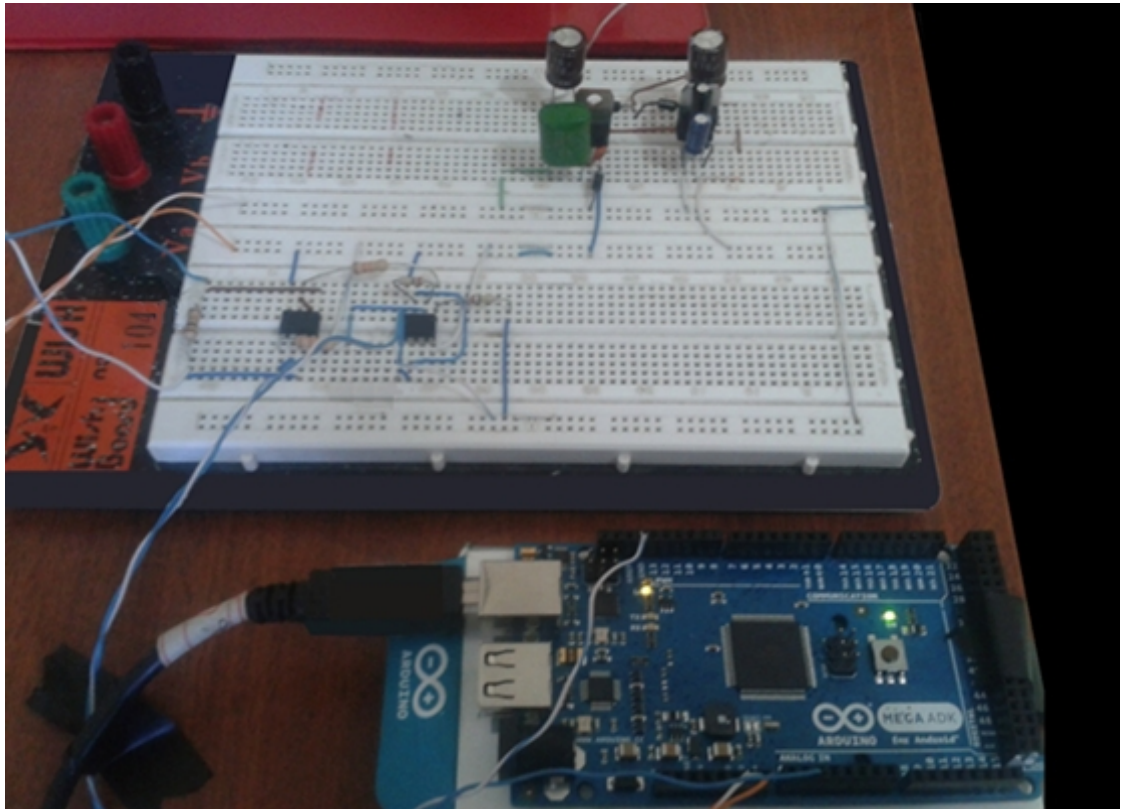


Figura 49. Implementación del sensor para la adquisición de datos vía Arduino.

Se realiza la sincronización a través del puerto serial entre Arduino y Matlab, para muestrear la corriente al mismo tiempo que se genera la trayectoria a seguir.