



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO  
PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO**

**Eddy Oscar Augusto Girón Hernández**

Asesorado por Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO  
PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDDY OSCAR AUGUSTO GIRÓN HERNÁNDEZ**  
ASESORADO POR ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

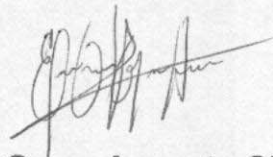
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 11 de octubre de 2013.



**Eddy Oscar Augusto Girón Hernández**

Guatemala, 2 de julio de 2014.

Ing. Otto Fernando Andrino González  
Coordinador de Área de Electrotecnia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Andrino:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO", desarrollado por el estudiante Eddy Oscar Augusto Girón Hernández con carné No. 2008-15449, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
ASESOR  
Colegiado 5898

*Guillermo A. Puente R.*  
INGENIERO ELECTRONICO  
COL. # 5898



Ref. EIME 45.2014  
Guatemala, 18 de SEPTIEMBRE 2014.

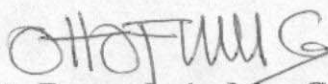
Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL  
DERIVATIVO PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL  
ALGORITMO GENÉTICO**, del estudiante **Eddy Oscar Augusto  
Girón Hernández**, que cumple con los requisitos establecidos para tal  
fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. **Otto Fernando Andrino González**  
Coordinador Área Electrotécnica



SFO



REF. EIME 45. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **EDDY OSCAR AUGUSTO GIRÓN HERNÁNDEZ** titulado: **PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero




GUATEMALA, 13 DE OCTUBRE 2014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **PROTOTIPO DE CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID AUTOSINTONIZABLE POR MEDIO DEL ALGORITMO GENÉTICO**, presentado por el estudiante universitario: **Eddy Oscar Augusto Giron Hernández** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

  
Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno  
Decano en Funciones



Guatemala, noviembre de 2014



## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por cuidarme, bendecirme y darme la oportunidad de tener muchos amigos de bendición para mi vida, por darme herramientas y a personas tan queridas que me permitieron lograr una meta más.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por darme el espacio para desarrollarme y aprender, por todos los catedráticos que me apoyaron y dedicaron su tiempo educándome y formándome.
- Lucinda Palacios** Por apoyarme durante los 5 años de la carrera, por ser mí soporte, mi pilar, por ayudarme a aprender de la vida e impulsarme en los estudios, por estar conmigo a pesar de las circunstancias.
- Mi familia** Por el esfuerzo realizado para sacarme adelante ya que sin ellos no lo hubiera podido lograr.
- Mi madre** Por creer en mí, por llenarme de su fortaleza y bondad, por ser quien eres.

**La familia Antonio Cáceres**

Por reforzar mis ideales, tener una opinión objetiva de la vida y a concentrarme por ayudarme a distinguir entre el bien y el mal.

**Vivian Godoy**

Por compartir conmigo en los buenos y malos momentos, por su apoyo incondicional.

**Luis Gudiel**

Por prestarme su paciencia y apoyarme para salir adelante.

**Todos mis amigos**

Por su cariño y amistad, por apoyarme en las buenas y en las malas, por dejarme aprender de ustedes y por el tiempo dedicado.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XIII
OBJETIVOS .....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. FUNDAMENTOS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	1
1.1. Optimización .....	4
1.2. Tipos de optimización .....	4
1.2.1. Optimización de prueba y error .....	5
1.2.2. Optimización de una variable y varias variables .....	5
1.2.3. Estático y dinámico .....	5
1.2.4. Discreto y continuo .....	5
1.2.5. Función objetivo .....	6
1.3. Población .....	6
1.4. Selección natural .....	6
1.5. Selección elitista .....	7
1.6. Reproducción o crossover .....	7
1.7. Mutaciones .....	8
1.8. Convergencia y divergencia.....	9
1.9. Codificación de las variables .....	9
1.10. Codificación Binaria .....	9

2.	ELEMENTOS DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).....	11
2.1.	Controlador de lazo abierto .....	11
2.2.	Controlador de lazo cerrado .....	11
2.3.	Modos de control.....	12
2.3.1.	Control de dos posiciones .....	12
2.3.2.	Controlador proporcional P.....	12
2.3.3.	Controlador integral I.....	13
2.3.4.	Controlador derivativo D.....	14
2.3.5.	Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) ..	15
3.	CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS.....	17
3.1.	Características de la Tarjeta DAQ NI USB 6008.....	17
3.2.	Especificaciones Detalladas DAQ NI USB 6008 .....	18
3.2.1.	Compatibilidad electromagnética .....	19
3.2.2.	Conformidad europea.....	19
3.2.3.	Grado de contaminación .....	20
3.3.	Características del codificador rotativo.....	20
3.3.1.	Resolución.....	21
3.3.2.	Respuesta máxima en frecuencia .....	22
3.3.3.	Diámetro del eje .....	22
3.3.4.	Par de arranque .....	22
3.3.5.	Velocidad máxima de rotación .....	22
3.3.6.	Momento de inercia.....	23
3.3.7.	Homologaciones y normalizaciones .....	23
3.4.	Tiristor TRIAC 2N6071 .....	24
3.5.	Características TRIAC 2N6071 .....	24
3.6.	Tiristor DIAC MPT 32 .....	25
3.7.	Opto acoplador MOC 3020 .....	26

3.8.	Características de Opto acopladores MOC 3020 .....	27
3.9.	El motor universal .....	28
3.10.	Control de velocidad por variación de tensión .....	28
4.	DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO .....	31
4.1.	Prototipo del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) Sintonizable .....	31
4.2.	Circuito Atenuador Digital <i>Dimmer</i> .....	31
4.2.1.	¿Cómo se calibra el controlador del motor? .....	32
4.2.2.	¿Cómo funciona el sistema PID?.....	34
4.3.	Red Snubber o circuito de ayuda a la conmutación.....	35
4.4.	Software del prototipo del algoritmo genético .....	36
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	39
5.1.	Ecuación propuesta .....	42
	CONCLUSIONES .....	45
	RECOMENDACIONES .....	47
	BIBLIOGRAFÍA .....	49
	ÁPENDICE.....	51



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Diagrama de flujo del algoritmo genético .....	2
2.	Comparación de métodos numéricos .....	3
3.	Diagrama de optimización .....	4
4.	Crossover .....	8
5.	Mutación .....	8
6.	Codificación binaria .....	10
7.	Circuito atenuador digital .....	32
8.	Gráfica de linealización .....	33
9.	Soluciones Proporcional Integral Derivativo PID .....	34
10.	Lazo de control PID con retroalimentación .....	35
11.	Población total de iteraciones.....	39
12.	Gráfica aproximaciones <i>versus</i> número de intentos.....	40
13.	Gráficos error <i>versus</i> número de intentos .....	41
14.	PID solución .....	42

## TABLAS

I.	Características de DAQ NI USB 6008 .....	17
II.	Especificación detallada DAQ NI USB 6008.....	18
III.	Valores nominales del TRIAC 2N6071 .....	25
IV.	Características eléctricas de MPT 32 .....	26
V.	Características eléctricas MOC3020 .....	27





## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
A/D	Analógico para digital
ADC	<i>Analogic to digital converter</i> (conversor analógico-digital)
Bps	Bits por segundo
de(t)/dt	Cambio del error respecto el tiempo
Ki	Constante de integración
D	Derivativo
I/O	Entradas y salidas
e(t)	Error en el tiempo
Cp(s)	Función de transferencia
Kp	Ganancia proporcional ajustable
°C	Grados centígrados
Hz	Hercios
I	Integral
KHz	Kilohercios
KS/s	( <i>kilosamples/second</i> ) kilo muestras por segundo
MHz	Megahercios
m	Metros
mm	Milímetros
N/cm	Newton por centímetro
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje

<b>P</b>	Proporcional
<b>SP</b>	Punto de consigna
<b>RPM</b>	Revoluciones por metro
<b>W</b>	Vatios
<b>VAC</b>	Voltaje de corriente alterna
<b>V</b>	Voltios

## GLOSARIO

<b>Amplificador</b>	Aparato o conjunto de ellos, que utilizando energía externa, se aumenta la amplitud o intensidad de un fenómeno físico.
<b>Banda muerta</b>	Rango de valores que puede variar la entrada sin producir un cambio observable en la salida.
<b>Bucle</b>	Es una sentencia que se realiza repetidas veces a un trozo aislado de código, hasta que la condición asignada a dicho bucle deje de cumplirse.
<b>Codificación</b>	Transformar mediante las reglas de un código la formulación de un mensaje.
<b>Control</b>	Tablero o panel donde se encuentran los mandos.
<b>Controlador</b>	Mando o dispositivo de regulación.
<b>Cromosomas</b>	Filamento condensado de ácido desoxirribonucleico, visible en el núcleo de las células durante la mitosis. El número es constante para cada especie animal o vegetal.

<b>Derivativo</b>	Es un concepto esencial para determinar los espacios tangentes sobre variedades diferenciables, las cualidades, las propiedades y las consecuencias.
<b>Diagrama de flujo</b>	Es la representación gráfica del algoritmo o proceso.
<b>Digito Binario <i>Bit</i></b>	Unidad de medida de información equivalente a la elección entre dos posibilidades igualmente probables.
<b>EMC</b>	<i>Electromagnetic Compability Directive</i>
<b>Error</b>	Es la diferencia entre el valor leído del instrumento y el valor real de la variable.
<b>Estacionario</b>	Dicho de un fenómeno físico, que se reproduce de forma idéntica a lo largo del tiempo.
<b>Ganancia</b>	Es una magnitud que expresa la relación entre la amplitud de una señal de salida respecto a la señal de entrada.
<b>Humedad relativa</b>	Se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera.
<b>Integral</b>	Cálculo de una cifra a partir de la expresión diferencial.

<b>Iteración</b>	Aplicando una función repetidamente, usando la salida de una iteración como la entrada a la siguiente.
<b>Magnitud</b>	Propiedad física que puede ser medida.
<b>Mando</b>	Dispositivo que permite actuar sobre un mecanismo o aparato para iniciar, suspender o regular el funcionamiento.
<b>Matriz</b>	Ordenación rectangular de elementos algebraicos que pueden sumarse y multiplicarse de varias maneras.
<b>Mutación</b>	Es una alteración o cambio en la información genética (genotipo) de un ser vivo.
<b>PID</b>	Proporcional Integral Derivativo
<b>Proceso</b>	Conjunto de las fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial.
<b>Punto de Consigna</b>	Es la salida del proceso que se desea un sistema de control automático tendrá como objetivo alcanzar.
<b>Proporcional</b>	Que aumenta o disminuye de igual forma o de manera inversa a otra cantidad con que se relaciona.

<b>Organismos</b>	Conjunto de órganos del cuerpo animal o vegetal y de las leyes por que se rige.
<b>Secuencia</b>	Cada uno de ellos es denominado término de la sucesión y al número de elementos ordenados.
<b>Sintonización</b>	Acción de ajustar el sistema de forma correcta.
<b>Sistema</b>	Conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí.
<b>Válvula</b>	Mecanismo que regula el flujo de la comunicación entre dos partes de una máquina o sistema.
<b>Variable controlada</b>	Es la variable directa a regular, sobre la que constantemente se está pendiente ya que afecta directamente al sistema del proceso, es decir, es la que dentro del bucle de control es captada por el transmisor para originar una señal de retroalimentación.
<b>Variable manipulada</b>	Es la que se modifica para afectar directamente a la variable controlada, es la herramienta para modificar la variable directa en el proceso. Es la cantidad que se encarga de variar los instrumentos finales de control.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación muestra como un método matemático puede ser utilizado para resolver problemas con cierto grado de complejidad. El algoritmo genético permite a un computador operar la capacidad de razonamiento, para encontrar soluciones a problemas prácticos posiblemente en sistemas mecatrónicos, tales como la sintonización PID.

En el primer capítulo muestra cómo se tomó a la genética para diseñar un algoritmo que permite hallar soluciones al problema que se presente, para ello se definen los fundamentos básicos que forman parte del método matemático algoritmo genético y el diagrama de flujo que lo compone.

El segundo capítulo, está enfocado en los sistemas de control, las particularidades de cada uno, y se detalla la composición del sistema PID, la ecuación de cada uno de los controladores y las particulares que puedan existir en la sintonización.

En el tercer capítulo se detallan las características de la tarjeta NI USB-6008, ya que, se utiliza para la adquisición de datos y el control automático del sistema, se especifica el rendimiento de la misma para obtener los límites del prototipo, los cuales se definen junto con las características de los demás dispositivos utilizados, tanto en el desarrollo del sistema PID como para el algoritmo genético.

En el cuarto capítulo se halla el diseño propuesto de las partes que componen el sistema PID y del algoritmo genético, y los datos que necesita dicho prototipo para funcionar adecuadamente.

En el quinto capítulo se analizan los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas a dicho diseño, la ecuación de la solución del problema y las gráficas obtenidas.



# OBJETIVOS

## General

Diseñar un prototipo de control Proporcional Integral Derivativo (PID) autosintonizable por medio del algoritmo genético.

## Específicos

1. Presentar los fundamentos del algoritmo genético.
2. Detallar los elementos que conforman un control PID.
3. Definir las características de los dispositivos utilizados.
4. Realizar la propuesta de diseño de hardware y software del prototipo del control PID sintonizable por medio del algoritmo genético.



## INTRODUCCIÓN

El algoritmo genético es un procedimiento matemático utilizado para resolver problemas con múltiples variables, este método copia el comportamiento genético, en donde, en el momento de la procreación es transmitida cierta información tanto de los genes del padre y de la madre al descendiente, de la misma forma como lo hicieron los abuelos con los padres y los padres con los hijos, como ha venido sucediendo de generación en generación durante todo el tiempo.

Los sistemas de control Proporcional Integral Derivativo (PID) surgieron en 1940, son herramientas estándar en el control de un proceso, estos son utilizados para mejorar la calidad de los productos en procesos automatizados, y funcionan a través de la corrección de los procesos y de una retroalimentación, evaluando señales eléctricas obtenidas por sensores que se encuentran registrando cualquier inconveniente que pueda afectar la calidad de los productos.

La tarjeta DAQ (*Data Acquisition*) es un elemento que contiene varios circuitos periféricos, por medio de ellos es posible procesar conjuntos de señales físicas, convertidas a eléctricas, para luego digitalizarlas de tal forma que puedan ser transferidas al computador. Mediante esta tarjeta es que se pretende realizar la comunicación entre elementos de control físicos y los dispositivos lógicos.

El inconveniente de un sistema de control PID es la sintonización del mismo, existiendo varias técnicas para ello, durante este trabajo de graduación

se utilizó el algoritmo genético para sintonizar automáticamente un prototipo de un circuito de control PID.

Encontrar la solución al problema se logra al combinar la capacidad de análisis del algoritmo genético proporcionando al circuito de control la posibilidad de aprender durante cada iteración, pudiendo así alcanzar la sintonización automáticamente, entendiendo esta como los valores eficientes del circuito PID que permitan el menor error posible durante una fluctuación del sistema.

Se determina que la optimización es la adecuada con ayuda de la ecuación objetivo, que se determina por medio del valor promedio del error, comparando este valor con los correspondientes a las iteraciones de cada población para hallar los valores de los individuos elites y así ser los candidatos próximos a reproducirse para la siguiente iteración.

# 1. FUNDAMENTOS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Esta metodología está basada en la teoría de la Evolución de las Especies de Charles Darwin y la genética, en donde todos los seres vivos transmiten durante la procreación información genética, en ella se define las características de una cría, tal como el color de los ojos, tipo o color del pelo, forma de las orejas, etc., estos bloques de información se conocen como cromosomas, el ser humano presenta 23 pares de cromosomas, que determinan los rasgos físicos internos y externos del individuo.

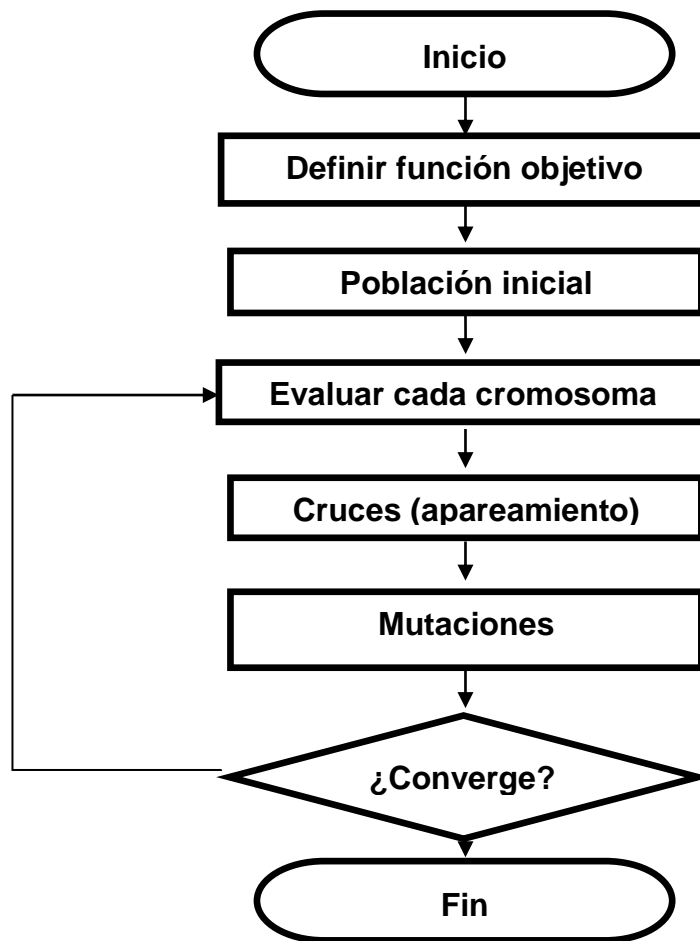
Durante la reproducción sexual los genes de un descendiente está conformada por el aporte genético de ambos progenitores mediante la fusión de las células sexuales o gametos; es decir, la misma reproducción sexual es fuente de variabilidad genética, esta es una de las razones que el algoritmo genético que le permite iterar hasta llegar a la solución más conveniente o a la mejor solución del problema.

Existen factores como el entorno que crean cambios en los progenitores, así pues afectan a las crías, a este fenómeno se le da el nombre de evolución, esta se ve representada como mutaciones en los cromosomas, y permite al nuevo individuo adaptarse de mejor manera a los cambios del entorno.

El algoritmo genético es un método matemático que tiene muchas de las características de la genética, pero en este caso se toman poblaciones de números, entonces se evalúan en una función objetivo determinada, que representa el problema a resolver, estos resultados se someten a una evaluación, que determina a la población más apta, esta población se

reproduce y esta propensa a mutaciones hasta llegar al valor óptimo después de varias iteraciones termina el método con una solución final. El diagrama de flujo se muestra en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo genético



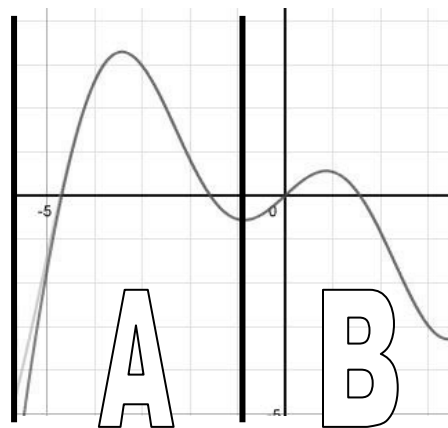
Fuente: elaboración propia.

El algoritmo genético como método matemático tiene la ventaja de poder obtener el máximo o mínimo, si así se desea, de una función objetiva determinada, utilizando valores al azar, es posible localizar el máximo global de

la función, así como también los máximos locales, lo que permite conocer más a fondo la función objetivo, y encontrar la solución óptima, en comparación a otros métodos que solo localizan un máximo sin importar si es local o global, en estos métodos es necesario definir los rangos nuevamente.

En la figura 2 se muestra que para que el algoritmo genético pueda hallar el máximo global solo es necesario definir el rango de valores una sola vez, mientras que para los otros métodos, el rango A, permite encontrar el valor correspondiente al máximo global y el rango B permite conocer el máximo específico para ese rango.

Figura 2. **Comparación de métodos numéricos**



Método	Rango A	Rango B
Algoritmo genético	(-5, 5)	(-5,5)
Método de Newton	(-5, -1)	(-1,1)
Método de la Secante	(-5, -1)	(-1,1)

Fuente: elaboración propia.

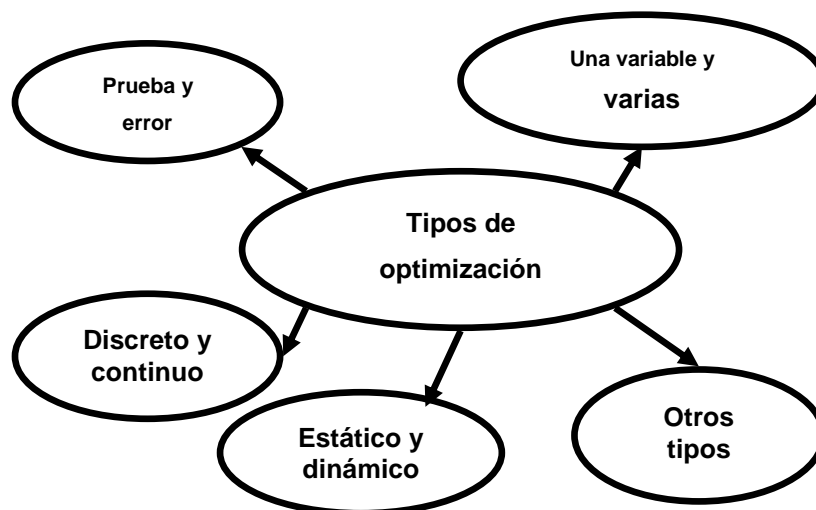
## 1.1. Optimización

“Dentro de la investigación operativa, las técnicas de optimización se enfocan en determinar la política a seguir para maximizar o minimizar la respuesta del sistema. Dicha respuesta, en general, es un indicador del tipo “Costo”, “Producción”, “Ganancia”, etc., la cual es una función de la política seleccionada. Dicha respuesta se denomina objetivo, y la función asociada se llama función objetivo. Para poder mejorar los resultados de la función objetivo, es importante conocer los tipos de optimización que existen”<sup>1</sup>. Las cuales son:

## 1.2. Tipos de optimización

Para poder mejorar los resultados de la función objetivo, es importante conocer los tipos de optimización que existen, las cuales son

Figura 3. Diagrama de optimización



Fuente: elaboración propia.

<sup>1</sup> BAQUELA; REDCHUCK. *Teoría de optimización con R*. 123.p.



### **1.2.1. Optimización de prueba y error**

Una optimización de prueba y error no es la mejor optimización que existe dado que se enfoca a encontrar solo una solución, no le interesa si es la mejor solución que existe, o que otras soluciones existen, perdiéndose la capacidad de aprender de los problemas, también las soluciones no son generales, por eso, no es posible aplicarlas a otros problemas similares. Para encontrar una solución no es necesario conocer la ecuación del proceso, por lo tanto lo hace un método lento y a la vez costoso ya que se requieren de diversos medios para realizarse.

### **1.2.2. Optimización de una variable y varias variables**

La función objetivo puede ser dependiente de una variable o depender de muchas variables al mismo tiempo, este tipo de optimización busca la solución óptima a través de un método sistemático, en algunos casos se utilizan métodos de matemáticas avanzadas donde se resuelven los sistemas de ecuaciones uno a la vez hasta resolver el sistema completamente.

### **1.2.3. Estático y dinámico**

La optimización para variables estáticas y dinámicas hacen referencia a la dependencia en el tiempo, en este caso, con variables estáticas la optimización no es dependiente del tiempo, mientras que dinámico si lo es.

### **1.2.4. Discreto y continuo**

Las variables a evaluar pueden estar contenidas en dos categorías que pueden ser discretas o continuas, en ambos casos la optimización se logra por

métodos diferentes que permitan garantizar que se está utilizando la metodología adecuada a los tipos de datos con que se está trabajando, discretos cuando el número de datos es finito, separados y distintos. En variables continuas cuando son valores infinitos.

### **1.2.5. Función objetivo**

La función objetivo de un algoritmo genético es la ecuación del problema que se pretende optimizar, es de suma importancia determinar correctamente los alcances y tener los objetivos claros dado que una determinación incorrecta de la optimización, representa resultados incorrectos en la salida del algoritmo genético.

### **1.3. Población**

Es un conjunto de posibles soluciones tomadas al azar y son parte del universo de valores dados en un rango de valores, la población es generacional, es por eso que, cada nueva población está mejor adaptada al medio en el que se encuentra. En este método, solo los individuos mejor adaptados tienen la posibilidad de engendrar nuevos individuos.

### **1.4. Selección natural**

La premisa más importante de la selección natural es que “la supervivencia del más apto...”<sup>2</sup> lo que permite seleccionar a los individuos con habilidades para la supervivencia y es por ello que tienen más posibilidades de reproducirse. A pesar de lo mencionado anteriormente, los efectos del azar

---

<sup>2</sup> DARWIN, Charles. *Normativa de Supervivencia*. 45. p.

hacen que la aptitud pueda observarse, tan solo, como un promedio en los individuos de una población.

Se realiza una selección de los individuos más capacitados, para que estos sean los que se reproduzcan con mayor probabilidad, de acuerdo con la teoría de Darwin, a partir de los individuos más capacitados son los que deben sobrevivir y crear una nueva descendencia mejor adaptada. Una vez evaluado cada cromosoma y obtenida la puntuación, se tiene que crear la nueva población, teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a las siguientes generaciones.

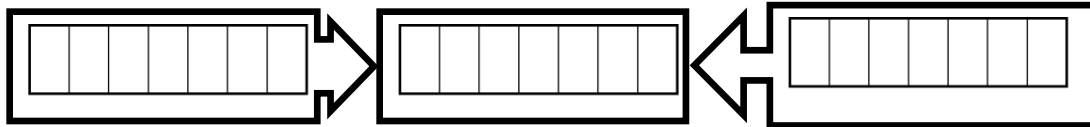
### **1.5. Selección elitista**

Este método no permite que se pierda la mejor solución, manteniendo el mejor cromosoma de cada iteración en la siguiente, el resto de la población es reemplazada por la siguiente generación por medio de la reproducción. El mejor gen se mantiene a la siguiente generación, en caso de que tras las reproducciones y mutaciones a las que son sometidas, no se haya obtenido un gen más apto.

### **1.6. Reproducción o crossover**

Es la creación de uno o más cromosomas a través de la reproducción debida a la selección natural de los padres, generando por este medio la siguiente generación para la próxima iteración. Cada uno de los cromosomas a reproducirse se enlaza entregando, parte de los genes para formar un individuo con características únicas provenientes de ambos padres, esta reproducción se repite a cada iteración hasta obtener la respuesta diciendo que el sistema converge o diverge dependiendo del proceso.

Figura 4. **Crossover**



Fuente: elaboración propia.

### 1.7. **Mutaciones**

Las mutaciones son todos aquellos cambios que ocurren en las características de un ser vivo, debido a un cambio en la información genética de manera indeterminada, en otras palabras, el cambio ocurre en el organismo. De similitud con el algoritmo genético representa cambios en un cromosoma.

Las mutaciones alteran algún bit de un cromosoma al azar en cierto porcentaje, esto permite tener mayor variedad de valores en la población reduciendo el número de valores repetidos, para que este sea el mínimo en siguientes iteraciones.

Figura 5. **Mutación**



Fuente: elaboración propia.

## **1.8. Convergencia y divergencia**

Los métodos matemáticos se basan en las aproximaciones, en cada iteración el método se acerca a la solución, hasta que el error se encuentra en la tolerancia permitida, cuando esto sucede, se dice que el método converge. Existen ciertos problemas donde las aproximaciones no logran entrar en la tolerancia permitida, hasta que se supera el número de iteraciones permitidas por el método, en este caso se dice que el método diverge.

## **1.9. Codificación de las variables**

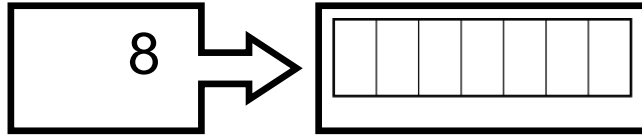
Los cromosomas de alguna manera deberán contener información acerca de la solución que representa. La codificación se puede realizar de varias formas. La más utilizada es mediante una cadena de números binarios (1 o 0). Pero también se puede realizar a partir de números enteros o incluso cadenas de palabras.

La elección de la codificación dependerá también del problema a para utilizar la codificación adecuada.

## **1.10. Codificación Binaria**

Es la codificación más extendida, debido a que los primeros algoritmos genéticos utilizaron este tipo de codificación. En este caso, cada cromosoma es una cadena de bits. Es un mecanismo que puede abarcar muchos cromosomas incluso con un número reducido de genes. Sin embargo, por otro lado esta opción no es la idónea para muchos problemas.

Figura 6. **Codificación Binaria**



Fuente: elaboración propia.

## **2. ELEMENTOS DE UN CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)**

Un proceso industrial comienza con la medición de una variable, así pues, es el efecto de un fenómeno físico, esto puede ser la temperatura, velocidad, fuerza, etc. Esta información es utilizada para llevar a cabo una decisión acerca del control. Es por ello que se definirá a un proceso industrial como un conjunto de acciones que obedecen a una secuencia determinada que son efectuadas con el propósito de que estas se realicen de conformidad a un plan, eficiente que ayude a mejorar los sistemas industriales.

### **2.1. Controlador de lazo abierto**

Se les conoce como controladores de lazo abierto a aquellos sistemas donde no existen variables controladas, por tanto, no hay una variable manipulada, como tal, estos cuentan con elementos de control con valores predeterminados que permiten el acondicionamiento de los procesos.

### **2.2. Controlador de lazo cerrado**

Son procesos retroalimentados a través de las señales provenientes de los sensores que permiten ajustar continuamente los mandos finales de control, esta señal es comparada con un valor de consigna establecido.

## **2.3. Modos de control**

Hay cuatro tipos diferentes de modos de control, para empezar son: control de dos posiciones, control proporcional, control integral y control derivativo, que a continuación se describen:

### **2.3.1. Control de dos posiciones**

Estos se conocen comúnmente con el nombre de *on-off*, este tipo de control tienen dos puntos de consignas, a este rango entre ellos se conoce como banda muerta, si la variable controlada supera alguno de ellos, el controlador enciende o apaga el elemento final de control, se utiliza en procesos industriales en donde no se requiere un control exhaustivo sobre el proceso, como por ejemplo refrigeración, ventilación, sistemas de calefacción o de aires acondicionados.

### **2.3.2. Controlador proporcional P**

Constituye una ganancia cuya función es amplificar el error de forma ajustable, en otras palabras es el producto de la multiplicación entre la señal de error y la ganancia proporcional, esta ganancia no depende del tiempo, ya que es un valor fijo establecido mediante la sintonización del control. Las características de esta ganancia se pueden modelar por medio de una línea recta.

La ecuación del controlador P simplificada es:

$$U(t) = (K_p) \times e(t) \quad (I)$$

Que describe desde la función transferencia queda:



$$Cp(s) = Kp. \quad (II)$$

Donde:

$Kp$  = ganancia proporcional ajustable

$e(t)$  = error en el tiempo

El controlador proporcional se basa en el presente, es una transformación del error instantáneo buscando corregir este.

### **2.3.3. Controlador Integral I**

Es un valor acumulado de la variable controlada en el tiempo, el comportamiento de este controlador, depende del error en el tiempo, que es la diferencia entre el punto de consigna y la variable controlada, cuando este se vuelve más pequeño, acciona con un ritmo bajo, mientras la variable controlada se encuentre debajo del punto de consigna el valor de esta acción será positivo, hasta que el error sea cero, la acción de este controlador será cero, hasta detenerse logrando consigo la estabilidad del sistema.

La ecuación del controlador I es:

$$U(t) = Ki \times \int_0^t e(t)dt \quad (III)$$

Donde:

$Ki$  = constante de integración

$e(t)$  = error en el tiempo

Y su función de transferencia es:

$$C_p(s) = \frac{K}{s} \quad (IV)$$

El control integrativo se basa en las situaciones del pasado, y según esto toma la decisión para corregir el error.

#### **2.3.4. Controlador derivativo D**

El controlador derivativo determina un valor que representa los cambios de error. Este será positivo si el punto de consigna es mayor que la variable controlada, si la constante de derivación es grande el sistema será inestable, mientras que un valor pequeño provocará un mayor número de oscilaciones, al comparar con el valor correcto. Para realizar las mínimas oscilaciones es necesario asignar la constante de derivación óptima.

La ecuación del controlador D simplificada es:

$$U(t) = K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (V)$$

Donde:

$K_d$  = constante del problema

$e(t)$  = error en el tiempo

$\frac{de(t)}{dt}$  = cambio del error respecto el tiempo

La parte derivativa busca hallar una tendencia, se basa en el presente pero para avanzar hacia el futuro, por medio de esta tendencia busca corregir el error por medio del mismo. Se puede decir que el control derivativo predice el futuro.

### 2.3.5. Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

Cuando se utiliza un controlador PID, la sintonización del sistema se comporta de tres maneras diferentes que son subamortiguado, amortiguado crítico y sobreamortiguado. El modo sobreamortiguado responde de manera lenta ante fluctuaciones, esto se nota en menos oscilaciones, es un sistema estable pero lento para llegar al punto de consigna.

El amortiguamiento crítico se obtiene cuando un sistema tiene los valores de las constantes eficientes. El sistema es estable responde correctamente entre perturbaciones y llega al punto de consigna con las mínimas oscilaciones. El subamortiguamiento, responde rápidamente a los cambios se comportan oscilatoriamente y no llega al punto de consigna.

La ecuación del controlador PID simplificada es:

$$U(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int_0^t e(t)dt + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (VI)$$

Donde:

$K_p$  = constante proporcional

$e(t)$  = error en el tiempo

$K_i$  = tiempo integral del problema

$K_d$  = tiempo derivativo del problema

$\frac{de(t)}{dt}$  = cambio del error respecto el tiempo

Y la función transferencia resulta:

$$C_{pid}(s) = K_p \times \left( 1 + \frac{K_i}{s} + s \times K_d \right) \quad (VII)$$

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS

Todos los dispositivos detallados a continuación, son los elementos utilizados durante la realización de la propuesta de diseño del prototipo, a continuación se muestran algunas de las características inherentes de cada uno de ellos y por tal motivo, fueron utilizadas en este diseño.

#### 3.1. Características de la tarjeta DAQ NI USB 6008

Las tarjetas de datos DAQ 6008, son dispositivos DAQ de bajo costo con conectividad por medio de borneras fáciles de usar y un factor de forma pequeño. Con sistema *plug-and-play* USB, estos dispositivos son lo suficientemente simple para mediciones rápidas, pero lo suficientemente versátil para aplicaciones de medición más complejas. Una tarjeta NI DAQ USB 6008 está provista de 8 entradas analógicas, y 2 salidas analógicas, 12 señales digitales I/O, y un contador de 32 bits, energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada, que se muestra a continuación:

Tabla I. **Características de DAQ NI USB 6008**

CARACTERÍSTICAS	NI USB-6008
RESOLUCIÓN DE ENTRADAS ANALÓGICAS	12 bits diferenciales
	11 bits única composición
MÁXIMA VELOCIDAD DE MUESTRO PARA ENTRADAS ANALÓGICAS CANAL UNICO	10KS/s
MÁXIMA VELOCIDAD DE MUESTRO PARA ENTRADAS ANALÓGICAS MULTIPLE CANAL	10KS/s
CONFIGURACION DE ENTRADAS /SALIDAS DIGITALES	Colector abierto

Fuente. <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>>. Consulta: 25 de mayo de 2014.

### 3.2. Especificaciones Detalladas DAQ NI USB 6008

Las siguientes especificaciones del dispositivo NI DAQ USB 6008 están tomadas bajo pruebas realizadas a una temperatura de 25 centígrados, y condiciones nominales de operación, a menos que se indique lo contrario en los apartados siguientes, los resultados se muestran a continuación:

Tabla II. Especificación detallada DAQ NI USB 6008

Entradas Analógicas	
Tipo de conversión	Aproximaciones sucesivas
Entradas análogas	8 terminaciones únicas, 4 diferenciales, seleccionables por medio de software
Resolución de la entrada	12 bits en forma diferencial, 11 bits en terminación única
Máximo rango de muestreo	10kS/s
AI FIFO	512 bytes
Tiempo de resolución	41.67ns (24MHz base de tiempo)
Tiempo de precisión	100ppm del rango de muestreo
Rango de entrada	
Terminación única	±10V
Diferencial	±20V, ±10, ±5V, ±4V, ±2.5V, ±1.25V, ±1V
Voltaje de Trabajo	±10V
Impedancia de entrada	144kΩ
Protección de Sobre voltaje	35V
Fuente del disparador	por medio del software o a través de un disparador externo digital
Ruido del Sistema	
Terminación Única	
± 10V	5mVrms
Diferencial	
± 20 V	5mVrms
± 1 V	0.5mVrms

Fuente. <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>>. Consulta: 30 de mayo de 2014.

### **3.2.1. Compatibilidad electromagnética**

“Es la aptitud de un dispositivo, aparato o sistema para funcionar en el entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro dispositivo situado en el mismo entorno”. (Gerín, Merlin, 2000, p. 34). Este producto está diseñado para satisfacer los requisitos de las siguientes Normas de EMC para equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio:

- EN 61 326 requisitos de compatibilidad electromagnética; inmunidad mínimo
- EN 55 011 emisiones; grupo 1, clase A
- CE, C-Tick, ICES, y FCC parte 15 emisiones; clase A

Nota: para el cumplimiento EMC, utilizar este dispositivo con cables con pantalla doble.

### **3.2.2. Conformidad europea**

Este producto cumple con los requisitos esenciales de las Directivas Europeas en vigor, en la versión modificada para el mercado CE, de la siguiente manera:

2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)

2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

- Medio ambiente
  - El dispositivo NI USB-6008/6009 está diseñado sólo para uso en interiores.

- Temperatura de funcionamiento
  - (IEC 60068-2-1 e IEC 60068-2-2) 0 a 55 °C.
  
- Humedad de funcionamiento
  - (IEC 60068-2-56) 5 a 95 por ciento de humedad relativa, sin condensación.
  - Altitud máxima 2000 m (a 25 °C de temperatura ambiente).
  
- Temperatura de almacenamiento
  - (IEC 60068-2-1 e IEC 60068-2-2) -40 a 85 °C.
  
- Humedad de almacenamiento
  - (IEC 60068-2-56) del 5 al 90 por ciento de humedad relativa, sin condensación.

### **3.2.3. Grado de contaminación**

El grado de contaminación de una sustancia indica si una determinada cantidad de componentes no deseados, está dentro de lo que las normas regulatorias nacionales o internacionales permiten para un determinado uso. Para este equipo se utiliza la (IEC 60664).

### **3.3. Características del codificador rotativo**

Los codificadores rotatorios (conocidos genéricamente como encoders) son mecanismos utilizados para entregar la posición, velocidad y aceleración del rotor de un motor. Las principales aplicaciones incluyen aplicaciones en robótica, lentes fotográficas, aplicaciones industriales que requieren medición angular, militares, etc., un codificador rotatorio es un dispositivo



electromecánico que convierte la posición angular de un eje, directamente a un código digital.

El dispositivo es capaz de entregar hasta 600 pulsos por rotación, en caso de usar la conexión monofásica, pero si se utilizan dos fases para la frecuencia se cuadriplica hasta 2 400 pulsos por rotación, la alimentación del sensor utiliza una fuente de alimentación de entre 5 hasta 24 VDC.

El eje del sensor es de 6 mm de diámetro, y una longitud de 13 mm. En total el tamaño del sensor es de 38 mm de diámetro y 35,5 mm de longitud. El tipo de salida para la conexión de 2 fases utilizando AB, la señal será un impulso ortogonal rectangular, la salida para el tipo de salida de colector abierto NPN. Velocidad mecánica máxima medible en el sensor es de 6 000 revoluciones por minutos, con él se obtiene una respuesta de frecuencia:

0-20KHz.

Aviso: en la salida de dos fases AB, no debe conectarse directamente con VCC, de lo contrario, se quemará el trío de salida.

### **3.3.1. Resolución**

Es el número de pulsos que da el codificador por cada revolución del eje. Valores típicos de resolución serían: 10, 60, 100, 200, 300, 360, 500, 600, 1 000 y 2 000 pulsos.

### **3.3.2. Respuesta máxima en frecuencia**

Se trata de la frecuencia máxima con la que el codificador puede responder eléctricamente, para garantizar el correcto funcionamiento. En los codificadores incrementales es el máximo número de pulsos de salida que se pueden emitir por segundo.

### **3.3.3. Diámetro del eje**

Diámetro del eje del codificador que debe encajar en el eje en donde se desea medir. Valores típicos de diámetro: 6, 7, 10,12 mm.

### **3.3.4. Par de arranque**

Fuerza necesaria medida en N/cm para conseguir que el eje comience a dar vueltas. Valores típicos: 1, 1.5, 2 N/cm.

### **3.3.5. Velocidad máxima de rotación**

El número máximo de revoluciones que el codificador puede soportar mecánicamente. La velocidad del eje codificador debe respetar la velocidad máxima de rotación y la frecuencia máxima de respuesta  $\text{Frecuencia} > \text{revoluciones por minuto} / 60 * \text{resolución}$ . Los valores típicos de respuesta:

3 000, 5 000, 6 000 revoluciones por minuto.

### **3.3.6. Momento de inercia**

Es la rotación del eje. Cuanto menor sea el valor de inercia, más sencillo es el mecanismo para detenerse y arrancar.

### **3.3.7. Homologaciones y normalizaciones**

Es el término que se usa en varios campos para describir la equiparación de las cosas, ya sean estas características, especificaciones o documentos entre las cuales se mencionan las más importantes.

- CENELEC: compatibilidad europea. <http://www.cenelec.org>
- NAMUR: ambientes explosivos. <http://www.namur.de>
- DIN: dimensiones, formas, códigos de color. Alemania
- <http://www2.din.de>
- VDE: seguridad eléctrica. <http://www.vde>
- IEC: internacional. ISO. <http://www.iec.ch>
- UL: Estados Unidos. Pruebas para componentes
- Listing Mark y Recognition Mark. <http://www.ul.com/>
- CSA: canadiense. <http://www.csa.ca>

### **3.4. Tiristor TRIAC 2N6071**

Este dispositivo está diseñado principalmente para aplicaciones de control de corriente alterna de onda completa, tales como reguladores de luz, controles de motor, controles de calefacción y fuentes de alimentación; u otras donde se necesite un dispositivo de estado sólido con compuerta para control de onda completa.

Los Tiristores tipo TRIAC pasan de un estado de bloqueo a uno de conducción, sin importar la polaridad de la tensión que se encuentre aplicado en el ánodo por medio de la excitación positiva o negativa de la compuerta de disparo.

### **3.5. Características TRIAC 2N6071**

Posee una compuerta sensible de disparo únicamente compatible por acoplamiento directo de señales TTL, HTL, CMOS y circuitos integrados con amplificadores operacionales con funciones lógicas.

Compuerta de disparo, soporta tensiones de bloqueo de hasta 600 V, lógica difusa, está formado por uniones de cristal apaciguado para permitir parámetros de uniformidad y la estabilidad. Pequeño, robusto, construido de material termopar para permitir una baja resistencia térmica, alta disipación de calor y durabilidad.

Este TRIAC soporta una corriente nominal de 4 amperios, esenciales para soportar aplicaciones de control para pequeños motores de corriente alterna AC, los valores nominales máximos del TRIAC 2N6071 se muestran a continuación.

Tabla III. Valores nominales del TRIAC 2N6071

Rating	Symbol	Value	Unit
*Peak Repetitive Off-State Voltage (Note 1) ( $T_J = -40$ to $110^\circ\text{C}$ , Sine Wave, 50 to 60 Hz, Gate Open)	$V_{\text{DRM}}$ , $V_{\text{RRM}}$	200 400 600	V
*On-State RMS Current ( $T_C = 85^\circ\text{C}$ ) Full Cycle Sine Wave 50 to 60 Hz	$I_{\text{T(RMS)}}$	4.0	A
*Peak Non-repetitive Surge Current (One Full cycle, 60 Hz, $T_J = +110^\circ\text{C}$ )	$I_{\text{TSM}}$	30	A
Circuit Fusing Considerations ( $t = 8.3$ ms)	$I^2t$	3.7	$\text{A}^2\text{s}$
*Peak Gate Power (Pulse Width $\leq 1.0$ $\mu\text{s}$ , $T_C = 85^\circ\text{C}$ )	$P_{\text{GM}}$	10	W
*Average Gate Power ( $t = 8.3$ ms, $T_C = 85^\circ\text{C}$ )	$P_{\text{G(AV)}}$	0.5	W
*Peak Gate Voltage (Pulse Width $\leq 1.0$ $\mu\text{s}$ , $T_C = 85^\circ\text{C}$ )	$V_{\text{GM}}$	5.0	V
*Operating Junction Temperature Range	$T_J$	-40 to +110	$^\circ\text{C}$
*Storage Temperature Range	$T_{\text{stg}}$	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
Mounting Torque (6-32 Screw) (Note 2)	-	8.0	in. lb.

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

- $V_{\text{DRM}}$  and  $V_{\text{RRM}}$  for all types can be applied on a continuous basis. Blocking voltages shall not be tested with a constant current source such that the voltage ratings of the devices are exceeded.
- Torque rating applies with use of a compression washer. Mounting torque in excess of 6 in. lb. does not appreciably lower case-to-sink thermal resistance. Main terminal 2 and heatsink contact pad are common.

Fuente: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/2N6071-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/2N6071-D.PDF). Consulta:

30 de mayo de 2014.

### 3.6. Tiristor DIAC MPT 32

El DIAC MPT 32 tiene un voltaje disruptivo de 32 V., que permite reducir la forma de onda hacia voltajes de salida manejables, los dispositivos de dos terminales presentan características de resistencia de conmutación negativas

simétricas. Estos dispositivos duraderos y económicos se han desarrollado para uso en circuitos con tiristores de disparo, conmutación de la señal y circuitos de detección. Las características eléctricas se muestran a continuación:

Tabla IV. **Características eléctricas de MPT 32**

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Breakover (switching) Voltage - both directions MPT28 MPT32	$V_{(BR)12}$ & $V_{(BR)21}$	24 28	28 32	32 36	Volt
Breakover (switching) Current - both directions	$I_{(BR)12}$ & $I_{(BR)21}$	-	20	50	$\mu$ Amp
Switchback (delta) Voltage - both directions MPT28 MPT32	$\Delta V_{12}$ & $\Delta V_{21}$	7.0 7.0	10 10	- -	Volt
Peak Blocking Current - both directions Voltage Applied = 18 V	$I_{(BL)12}$ & $I_{(BL)21}$	-	0.5	10	$\mu$ A
Breakover (switching) Voltage Temperature Coefficient, $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+100^\circ\text{C}$		-	0.03	-	$\%/^\circ\text{C}$

Plastic trigger devices have symmetrical characteristics and as such the terminal leads are interchangeable. For purposes of symbol clarification, the leads have arbitrarily been designated 1 and 2. A 12 designation indicates that terminal 1 is positive with respect to terminal 2, vice versa for a 21 designation.

Fuente.: <<http://www.datasheetarchive.com/dlmain/Databooks-2/Book501-3229.pdf>> [Consulta: mayo de 2014].

### 3.7. Opto acoplador MOC 3020

Circuito integrado compuesto por un interruptor bilateral tipo TRIAC, que soporta en las terminales de salida 400 V, construido con diodos de arseniuro de galio y un diodo óptico infrarrojo.

### 3.8. Características de Opto acopladores MOC 3020

Soporta un alto aislamiento de hasta 7 500 V de pico, es capaz de controlar en la salida 220 VAC, cuenta con un empaquetado estándar tipo DIP de plástico de 6 terminales se utilizan en aplicaciones como controles de solenoide o válvulas, lámparas balastos, utilizados en interfaces con microprocesadores para controlar 115/240 VAC, periféricos para controles de motor, lámparas incandescentes por atenuador digital AC *Dimmer*.

Tabla V. Características eléctricas MOC3020

electrical characteristics at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$I_R$	Static reverse current	$V_R = 3\text{ V}$	0.05	100		$\mu\text{A}$
$V_F$	Static forward voltage	$I_F = 10\text{ mA}$	1.2	1.5		V
$I_{(DRM)}$	Repetitive off-state current, either direction	$V_{(DRM)} = 400\text{ V}$ , See Note 5	10	100		nA
dv/dt	Critical rate of rise of off-state voltage	See Figure 1		100		V/ $\mu\text{s}$
dv/dt(c)	Critical rate of rise of commutating voltage	$I_O = 15\text{ mA}$ , See Figure 1		0.15		V/ $\mu\text{s}$
$I_{FT}$	Input trigger current, either direction	Output supply voltage = 3 V	MOC3020	15	30	mA
			MOC3021	8	15	
			MOC3022	5	10	
			MOC3023	3	5	
$V_{TM}$	Peak on-state voltage, either direction	$I_{TM} = 100\text{ mA}$	1.4	3		V
$I_H$	Holding current, either direction		100			$\mu\text{A}$

NOTE 5: Test voltage must be applied at a rate no higher than 12 V/ $\mu\text{s}$ .

Fuente: <http://www.datasheetarchive.com/dlmain/Databooks-2/Book501-3229.pdf>.

Consulta: 24 de mayo de 2014.

### **3.9. El motor universal**

Es el mismo motor serie de c.c. en el cual se ha alterado el diseño básico: Las pérdidas por histéresis se reducen empleando hierro al silicio laminado de alta permeabilidad; las pérdidas por corrientes parásitas se reducen al mínimo construyendo los circuitos magnéticos (estator , núcleo) con láminas de hierro-silicio especial; la reactancia del bobinado de campo se reduce empleando núcleos de polos cortos y bobinados de pocas vueltas; la reactancia del inducido se reduce utilizando bobinas compensadoras que se montan en el núcleo del estator. Funcionan con c.a. y c.c. y son de fracción de 1 hp y son usados principalmente en aparatos electrodomésticos. El inducido es igual al de un motor de c.c. funciona a la misma velocidad con c.c. o c.a. La velocidad se puede regular por medio de reóstatos y bobinas de tomas múltiples devanadas en torno del campo. Como es un motor serie, la carga siempre debe estar conectada al motor.

### **3.10. Control de velocidad por variación de tensión**

Si se varia el valor eficaz de la tensión estatórica del motor, mediante alguno de los métodos citados en el arranque, se modifica la curva del par, con lo que para una misma carga se consigue una variación de la velocidad. Se supone que mediante un autotransformador se reduce la tensión del motor desde el valor nominal hasta un 80 por ciento del mismo.

Este es el gran inconveniente de este sistema de variación de velocidad; los márgenes de variación del mismo son muy pequeños. Además, en el punto 2 el deslizamiento es mayor, con lo que aumentan las pérdidas y disminuye el rendimiento. Se disminuye la tensión por debajo del 80 % de la nominal, el motor perderá mucha capacidad de producir par, con lo cual es posible que no



pueda vencer el par resistente de la carga, a riesgo de sobrecargarse o incluso de calarse.

Las desventajas de este control son:

- Márgenes de variación de velocidad muy bajos
- Pérdida de par motor
- Pérdidas altas y rendimiento bajo



## **4. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO**

Los métodos convencionales para sintonizar un sistema de PID, determinan una solución para el problema, pero por medio de ellos no se determina si es la mejor solución del sistema, es por ello que se presenta esta propuesta del diseño, en este se analizan todas las soluciones obtenidas y permite conocer porque la solución final es la mejor solución presentada con base en una función objetivo determinada. A continuación se presenta las partes que componen el prototipo de PID auto sintonizable, por medio del algoritmo genético.

### **4.1. Prototipo del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) Sintonizable**

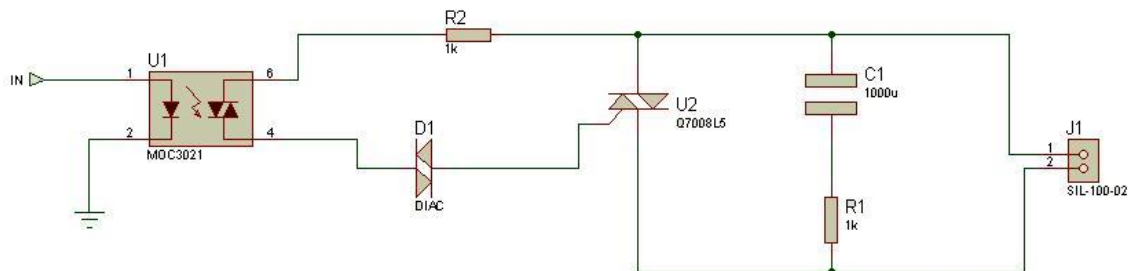
Para el funcionamiento del sistema se determinó una variable de proceso que está representada por la velocidad instantánea que procede del sensor codificador rotativo óptico instalado en un motor, que tiene las siguientes características 220 V, a una frecuencia de 60 Hz y una potencia de 100 W, y alcanza una velocidad de 6 500 RPM. Debido a las limitaciones del codificador rotativo el motor no supera los 6 000 RPM., de modo que se configuró la limitación de velocidad mediante el circuito de control y el circuito de potencia que se cuenta.

### **4.2. Circuito Atenuador Digital *Dimmer***

Este circuito regula la potencia por medio del acortamiento de la forma de onda sinusoidal, que será entregada a cualquier equipo conectado a él,

permitiendo el control de potencia a través del mismo, el diagrama se muestra a continuación:

Figura 7. **Circuito atenuador digital**



Fuente: elaboración propia, con programa de PC Wizard.

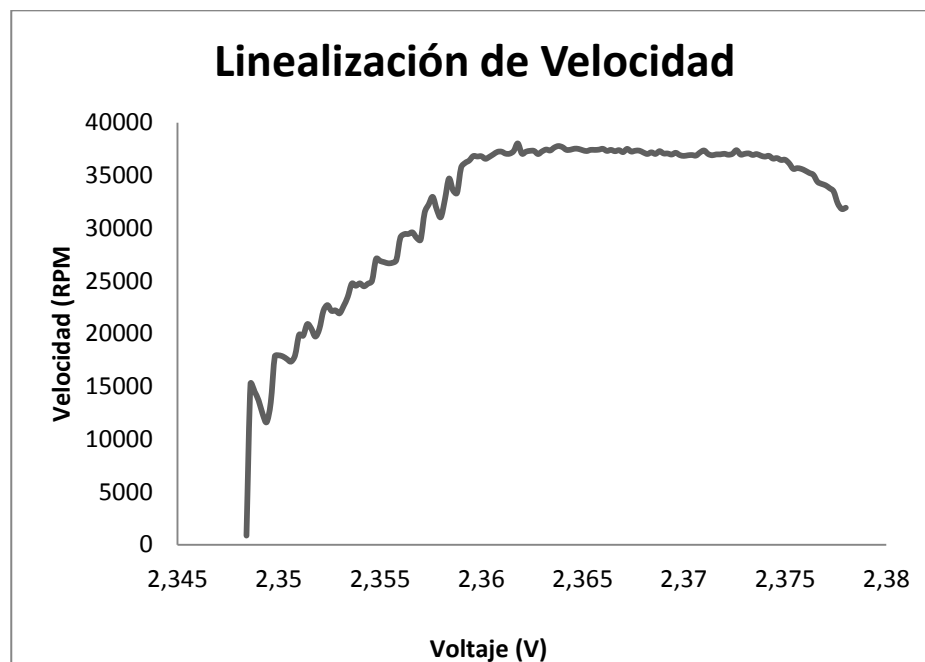
Este control consta de un MOC3020 (opto acoplador con salida de TRIAC), este dispositivo permite separar al circuito lógico de control a través de la tarjeta NI DAC USB 6008 del circuito atenuador, la tarjeta realiza el control del opto acoplador, a través de una señal de voltaje que puede variar de 0 a 5 V, se debe ajustar el control como se indica posteriormente, a continuación se muestra el diagrama de control:

#### 4.2.1. ¿Cómo se calibra el controlador del motor?

Una vez armado el circuito atenuador digital, se utiliza un programa de computadora desarrollado únicamente para conocer el comportamiento de la velocidad cuando se varía la intensidad de voltaje en el sistema de control, que corresponde al mando de este sistema, este software está realizado a través del lenguaje de programación Labview de National Instrument, que permite controlar la velocidad, que por medio del sensor codificador rotativo se adquiere

un tren de pulso, de donde se determina la velocidad, que puede variar desde 0 a 6 000 RPM, por medio del ordenador mientras que este software varía la intensidad de voltaje en el circuito control, ajustando la intensidad del opto acoplador se altera la intensidad del circuito de fuerza, hasta que el motor logra llegar a las 6 000 RPM en la velocidad de salida, para este ejercicio la intensidad de voltaje varía en un rango de 2,3661 hasta 2,3484 V, como se puede observar en la siguiente gráfica.

Figura 8. **Gráfica de linealización**



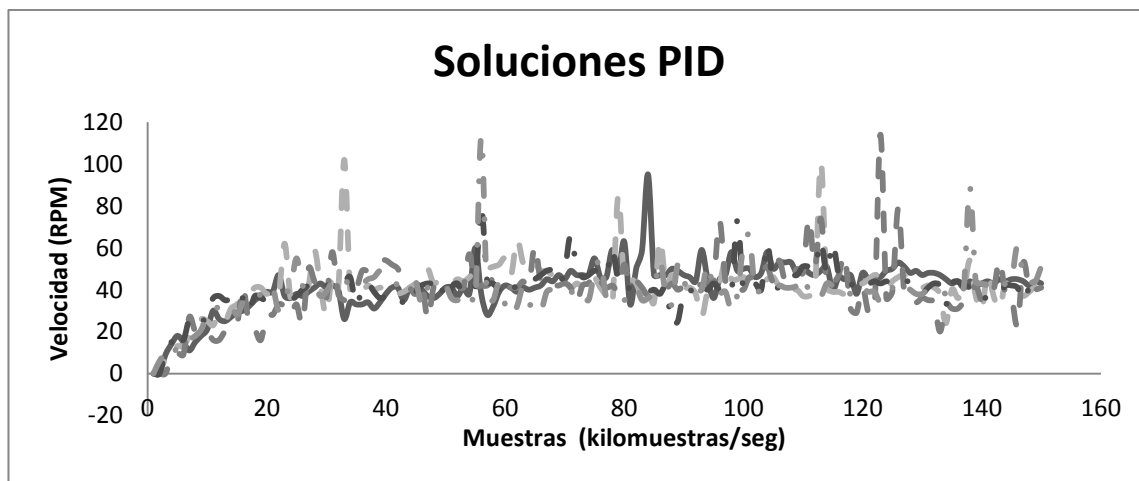
Fuente: elaboración propia.

La linealización de la velocidad se obtuvo utilizando la parte más lineal de la gráfica anterior, no se pueden obtener velocidades bajas para este sistema, ya que se debe vencer la inercia inicial de la máquina rotativa.

#### 4.2.2. ¿Cómo funciona el sistema PID?

El programa del PID recibe los valores de voltaje mínimo y máximo encontrados anteriormente, que representan el rango de valores que el NI DAQ USB 6008, y el valor de consigna está registrado en 48 % de la velocidad máxima, que corresponden a 2 880 RPM, (este valor fue designado al azar, en caso de una aplicación especial se utilizará el valor de diseño necesario), al mismo tiempo el programa leerá las variables proporcional, integral y derivativo, que le entrega el programa del algoritmo genético, como se explicará más adelante.

Figura 9. Soluciones Proporcional Integral Derivativo PID

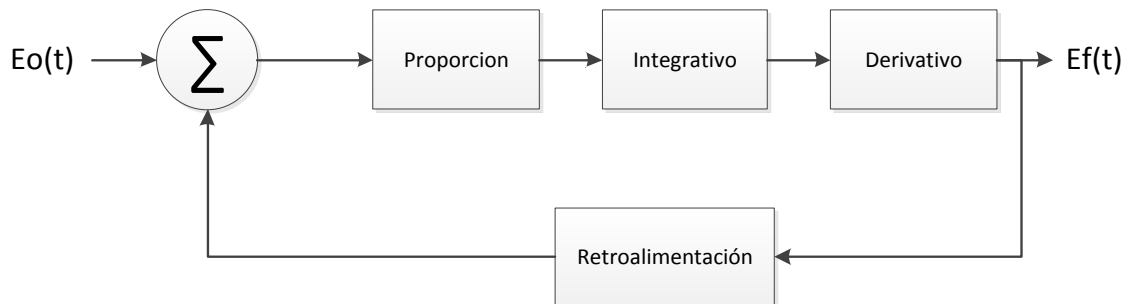


Fuente. elaboración Propia

Después de realizar los ajustes anteriores, comienza a funcionar el programa mediante un bucle donde se recibe el valor de velocidad, y entrega el error existente, que busca predecir el estado del error en la iteración N+1, luego

este error se opera para convertirse en un valor correspondiente entre el rango anteriormente citado.

Figura 10. **Lazo de control PID con retroalimentación**



Fuente: elaboración propia , con programa de PCWizar.

#### 4.3. **Red Snubber o circuito de ayuda a la conmutación**

La red snubber se compone por el circuito C1 y R1 de la figura 7. Los valores corresponden a un capacitor de 1 uF y a una resistencia de 1 kΩ. “La función principal que desarrollan los circuitos de ayuda a la conmutación es absorber la energía procedente de los elementos reactivos del circuito durante el proceso de conmutación controlando parámetros tales como la evolución de la tensión o corriente en el interruptor, o bien limitando los valores máximos de tensión que ha de soportar. Se incrementa de esta forma la fiabilidad de los semiconductores al reducirse la degradación que sufren debido a los aumentos de potencia disipada y de la temperatura de la unión.” (Pernía, 1999, p. 23.).

#### **4.4. Software del prototipo del algoritmo genético**

Este software está desarrollado por medio del lenguaje de programación LabView de National Instrument. El software inicia en el momento de asignar un valor de la variable denominada tamaño de la población, este parámetro afecta en gran medida la velocidad con que el algoritmo llega a obtener un resultado que pueda resolver el problema, dado que se hace funcionar el motor varias veces y para no afectar la vida útil del equipo, se dispone un tamaño de la población de 16, que permita al método converger más rápidamente, otros parámetros son el número de bits, el porcentaje de selección, que representa la cantidad de cromosomas que sobrevivirán para la siguiente iteración.

También al algoritmo genético se le debe asignar el número de variables a optimizar que corresponden a las variables sistema PID, una vez ingresados los parámetros, el programa empieza creando una matriz de ceros, por una función de aleatoriedad, que hace variar entre 0's y 1's, para obtener un valor binario aleatorio, el conjunto de estos valores forman genes, que cuentan con las tres variables PID.

Al obtener la población de genes indicada se forma una matriz, además se agregan dos columnas, una de ellas permitirá almacenar el error obtenido durante cada iteración y la siguiente columna agregada es para evitar que el sistema evalúe nuevamente un cromosoma ya evaluado, continuando con el siguiente gen.

Después de obtener la matriz genética comienza una secuencia que busca ordenar los datos, para ello se comienza por convertir el número binario de cada variable a decimal, después se multiplica por un operador que permite determinar el rango de valores de 0 a 10, después de haber obtenido la



respuesta con este método se pueden reducir los rangos cada vez más para ir encontrando una respuesta más eficiente.

Existe una lógica para determinar si el gen no se ha evaluado con anterioridad, esta consiste en verificar el valor que tiene la última columna del cromosoma, si la variable tiene 1, el valor de la penúltima columna se conserva y no es necesario evaluarlo de nuevo, si por el contrario esta tiene valor 0, se procede entregando las variables binarias proporcional, integral y derivativa al sistema.



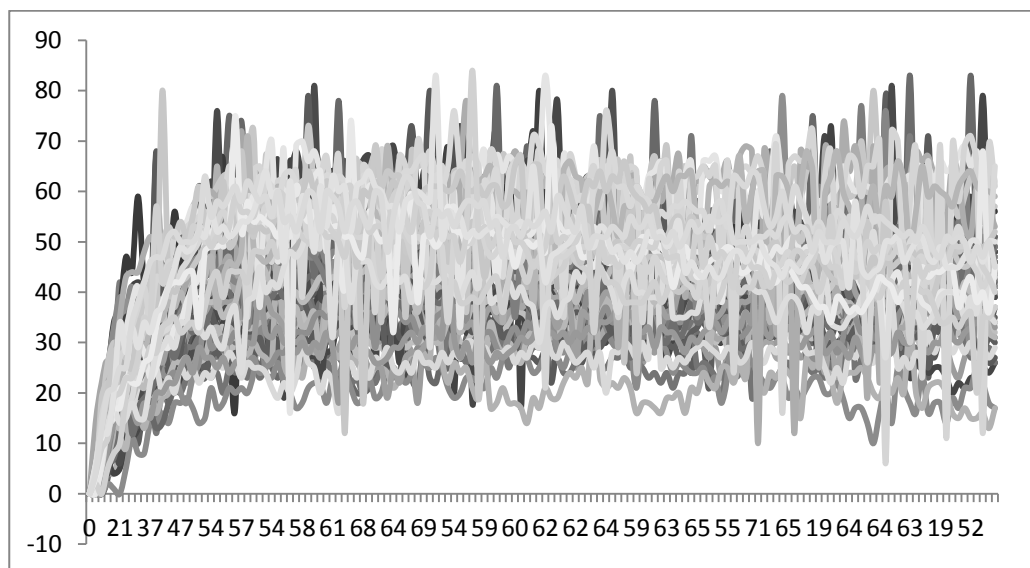
## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta práctica se realizó el día 3 de junio del 2014, bajo una temperatura ambiente de 20 °C. con una humedad relativa de 94 %, con una población inicial de 16 cromosomas, los resultados obtenidos se pueden observar a continuación:

La función objetivo es igual al valor promedio del error, tal como se muestra en la ecuación escrita a continuación:

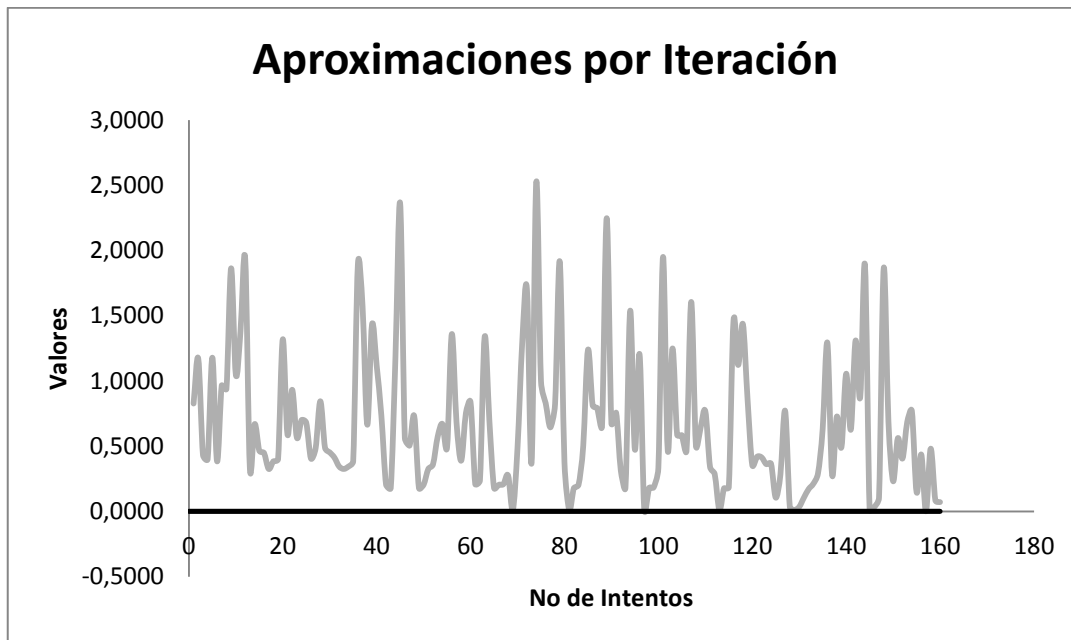
$$f(x) = \frac{\sum_{i=0}^n e_n(t)}{n}, \quad (\text{VIII})$$

Figura 11. Población total de iteraciones



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Gráfica aproximaciones versus número de intentos**

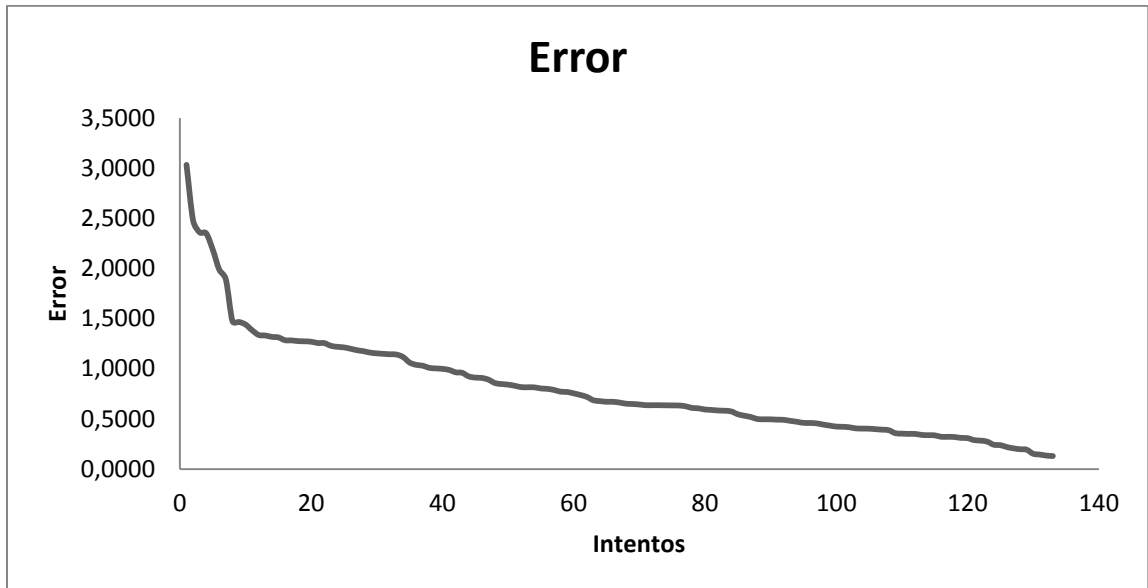


Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que conforme el número de iteraciones se va acrecentando, el error cometido va tendiendo a un valor cercano a 0, esto quiere decir que el sistema PID se recupera lo más rápidamente posible ante una posible fluctuación.

En la siguiente gráfica, se puede observar claramente la metodología elitista, ya que se mantiene el valor más apto, en este caso el valor del error más pequeño, hasta que otro lo supere, los valores con menor error sobreviven para la siguiente iteración y son los que tienen la oportunidad de realizar cruces para generar nuevas poblaciones y a la vez intenten lograr alcanzar el menor error.

Figura 13. **Gráficos error versus número de intentos**



Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se puede observar que en las primeras iteraciones siempre se logra una solución nueva, en un número menor de intentos conforme la solución se acerca a la respuesta ideal, al método le toma un mayor número de intentos seguir encontrando otros valores más eficientes.

Debido al desgaste de los equipos, y a que se requiere tener el máximo aprovechamiento de los mismos, el número de cromosomas es 16, un número lo suficientemente alto como para obtener valores al azar de todo el espacio muestral.

Debido a que el sistema operativo en el que se encuentra montado el software, no trabaja en tiempo real, existen pérdidas de datos limitando las capacidades del sistema PID.

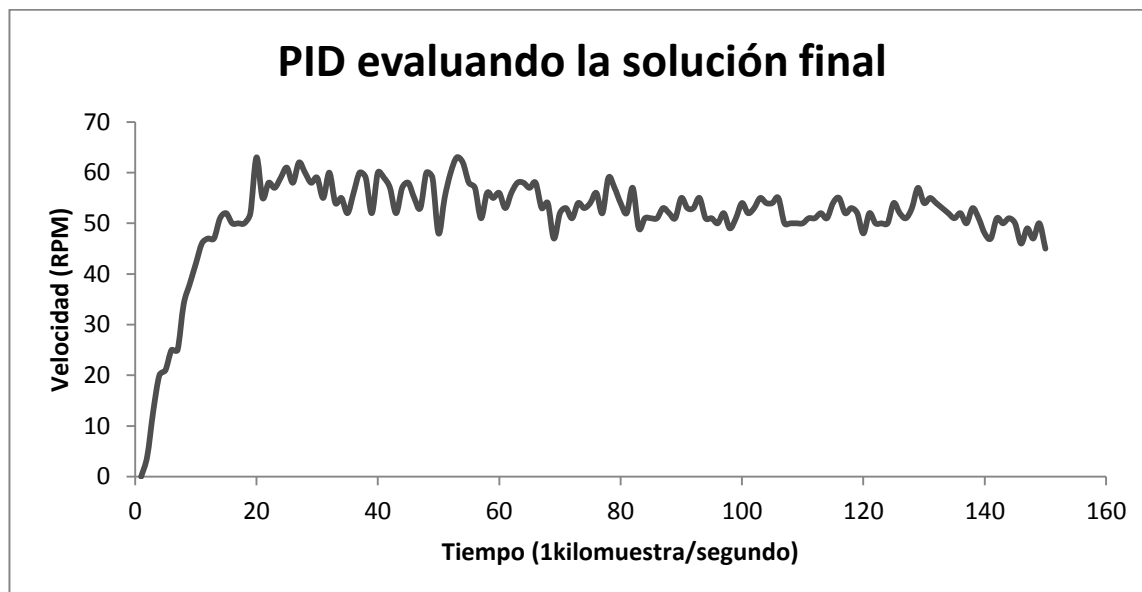
### 5.1. Ecuación propuesta

Los resultados obtenidos por medio del algoritmo genético pueden encontrarse en el apéndice 1, los valores PID más eficientes encontrados para este proyecto, con una población de 16 individuos, son un valor proporcional  $P = 2,4121$ , integral  $I = 0,5586$  y derivativo  $D = 0,8242$ , la ecuación de este circuito se muestra a continuación:

$$U(t) = (2.4121) \times e(t) + (0.5586) \times \int_0^t e(t)dt + (0.8242) \times \frac{de(t)}{dt} \quad (IV)$$

A continuación se muestra la gráfica correspondiente a los valores de la solución propuestos con el método del algoritmo genético:

Figura 14. PID solución



Fuente: elaboración propia.

El sistema muestra una solución cercana a la ideal, pero para seguir obteniendo respuestas más cercanas a la solución ideal, es posible cuando el rango del universo muestral, también se puede lograr mejores resultados incrementando el número de bits del sistema.





## CONCLUSIONES

1. Los fundamentos del algoritmo genético muestran una serie de pasos basados en el comportamiento genético, de tal forma que se pueden aplicar a resolver problemas de optimización.
2. Los elementos Proporcional Integral Derivativo (PID) son mecanismos que permiten predecir las correcciones debidas a fluctuaciones.
3. Estudiar las características de los dispositivos utilizados es de interés para determinar las limitantes del prototipo diseñado.
4. Un prototipo capaz de sintonizar un sistema PID por medio del algoritmo genético, puede ser realizado utilizando el potencial de razonamiento de un computador, un circuito de control y fuerza que puede ser un circuito atenuador digital, como el presentado en este trabajo de graduación, y el sistema PID a evaluar.
5. La optimización del algoritmo genético se lleva a cabo con la evaluación de una función objetivo que es planteada según las características del problema.
6. Los PID se utilizan en procesos industriales, donde la materia prima necesita una supervisión constante.

7. Es posible determinar el valor de las variables que representan un sistema PID, por medio del algoritmo genético, y plantear una ecuación con la solución encontrada, pudiendo plantear el sistema PID, utilizando la mejor sintonización que permiten los componentes con que se cuenta.

## RECOMENDACIONES

1. Es importante conocer el problema que se desea resolver a fondo para plantear correctamente la función objetivo del algoritmo genético.
2. Extender los estudios expuestos en sistemas Proporcionales Integrales Derivativos (PID), ya que, existen diferentes configuraciones, tales que, al implementarlas permiten mejorar en gran medida la estabilidad de los procesos.
3. Tomar en cuenta que al utilizar dispositivos de mayores capacidades en la construcción del prototipo se puede mejorar el número de aplicaciones en que el prototipo presentado se pueda utilizar.
4. Al momento de establecer la precisión requerida, tomar en cuenta que se debe incrementar o reducir el número de bits utilizados en el software del algoritmo genético.
5. Para obtener mejores resultados del algoritmo genético es de suma importancia la determinación de la población a través de métodos estadísticos.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Nacional del Café, S. A. *Clima de la ciudad de Guatemala*. Guatemala: Anacafe, 2014. 67 p.
2. BUSTILLOS MONTE, O. *Instrumentación Industrial*. Puerto de la Cruz: Universidad de Oriente. 2001. 23 p.
3. C. KUO, Benjamín. *Sistemas de Control Automático*. Illinois: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996. 78 p.
4. \_\_\_\_\_. *Sistemas de Control Automático*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996. 98 p.
5. C, Darwin. *Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London: John Murray.1869. 67 p.
6. CANALES, R., & Barrera , R. *Análisis de sistemas dinamicos y control automático*. México: Limusa.1976. 89 p.
7. GRIMANEY, I. J. *Controles electricos y automatizacion*. en i. j. grimaney, *controles electricos y automatizacion*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingenieria. 2008. 89 p.
8. GRIMANEY, I. J. *Controles electricos y automatizacion*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingenieria. 2008. 125. p.

9. Morilla F., D. S. *A systematic study of PID controllers tuning methods*. Alemania: Advances in Computer Sciecne. 2008. 56 p.
10. Mundo, P. n. *Portafolio.co noticias de economía y negocios en Colombia y el Mundo*. Recuperado el 18 de junio de 2014, de Portafolio.co: <http://www.portafolio.co/negocios/petroleras-locales-muestran-interes-bloques-guatemala>. [Consulta: febrero de 2012].
11. Ogata, K. *Ingeniería de control moderna*. Minnesota: Peason Educación. 1995. 67 p.
12. \_\_\_\_\_. *Sistemas de control en tiempo discreto*. México: Pearson Educación, 1995. 114 p.
13. Pernía, A. M.. *Protección eléctrica de semiconductores: Redes de ayuda a la conmutación disipativas y no disipativas*. Gijón: Universidad de Oviedo. 1999. 1225 p.
14. S. Nise, N. *Control System Engineering*. United States of America: Wiley International Edition. 200. 56 p.

## ÁPENDICE





Apéndice 1. Mediciones para algoritmo genético

No	Cromosoma	P	I	D	Error
1	101111100100101000010100	1,85546875	0,72265625	0,1953125	0,2840
2	110000111110100110100011	1,90429688	2,27539063	1,59179688	0,4220
3	110001011101001110100101	1,92382813	2,06054688	1,61132813	1,0310
4	000010110110001001011100	0,10742188	0,95703125	0,8984375	1,4670
5	100000110110010101010010	1,27929688	0,98632813	0,80078125	0,6630
6	010000001000001101100001	0,625	1,27929688	0,94726563	0,3220
7	100011010000100010110111	1,37695313	0,078125	1,78710938	0,8160
8	110011100110111111110010	2,01171875	1,08398438	2,36328125	1,1420
9	001001011011010001011110	0,36132813	1,7578125	0,91796875	0,8040
10	001101000000110111110110	0,5078125	0,12695313	2,40234375	0,4970
11	001011100000011010001010	0,44921875	0,05859375	1,34765625	0,2890
12	101001101011011000100100	1,62109375	1,77734375	0,3515625	0,4240
13	101101000001101110101100	1,7578125	0,26367188	1,6796875	0,8310
14	110010010011000011000110	1,96289063	0,46875	1,93359375	0,4930
15	101100001001110001110110	1,71875	1,5234375	1,15234375	0,6100
16	011000100111010111011000	0,95703125	1,14257813	2,109375	0,8150
17	101111100100101000010100	1,85546875	0,72265625	0,1953125	0,2840
18	001011100000011010001010	0,44921875	0,05859375	1,34765625	0,2890
19	010000001000001101100001	0,625	1,27929688	0,94726563	0,3220
20	101110110100001000010100	1,82617188	0,64453125	0,1953125	0,6370
21	001011100000111110001010	0,44921875	0,14648438	1,34765625	0,4610
22	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
23	110001001110101110100100	1,9140625	2,29492188	1,6015625	0,6270
24	101011011011100000101111	1,68945313	1,796875	0,45898438	0,3220
25	110000100011010111000000	1,89453125	0,51757813	1,875	1,3130
26	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
27	101100111001010101111010	1,74804688	1,45507813	1,19140625	0,1940
28	100000000110110001011110	1,25	1,0546875	0,91796875	0,8170
29	001001001011110101011110	0,3515625	1,84570313	0,91796875	0,9890
30	011010010111000011011110	1,02539063	1,09375	2,16796875	0,4990
31	100001100000011010111100	1,30859375	0,05859375	1,8359375	0,5820

Continuación del apéndice 1.

32	101100110001100110101011	1,74804688	0,24414063	1,66992188	0,5900
33	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
34	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
35	101100111001010101111010	1,74804688	1,45507813	1,19140625	0,1940
36	010100101000010101100000	0,80078125	1,29882813	0,9375	1,1850
37	001001000000110111111110	0,3515625	0,12695313	2,48046875	0,8000
38	101000001001110001111110	1,5625	1,5234375	1,23046875	0,6370
39	101010110100001000010100	1,66992188	0,64453125	0,1953125	0,4170
40	001101000000101110000100	0,5078125	0,10742188	1,2890625	1,1750
41	101100111011100100101011	1,74804688	1,80664063	0,41992188	0,3110
42	010101101000011001101100	0,83984375	1,30859375	1,0546875	0,3380
43	001110010000000010001110	0,55664063	0	1,38671875	0,9120
44	01111110011111111011010	1,23046875	1,24023438	2,12890625	0,5470
45	100100000000001110110001	1,40625	0,02929688	1,72851563	0,3930
46	101011010001100010101111	1,68945313	0,234375	1,70898438	0,6490
47	110111101110011010101010	2,16796875	2,24609375	1,66015625	1,2740
48	101011100100101000010100	1,69921875	0,72265625	0,1953125	0,9090
49	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
50	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
51	101100111001010101111010	1,74804688	1,45507813	1,19140625	0,1940
52	010011101000011001101110	0,76171875	1,30859375	1,07421875	1,3180
53	001100100000010111110100	0,48828125	0,04882813	2,3828125	1,2760
54	101101001001101101110000	1,7578125	1,51367188	1,09375	1,1610
55	101110011011000000101010	1,80664063	1,71875	0,41015625	1,4740
56	010111101000101001100000	0,91796875	1,34765625	0,9375	1,2000
57	100101000000110110111010	1,4453125	0,12695313	1,81640625	1,1490
58	101011010100100000011011	1,68945313	0,703125	0,26367188	0,9600
59	011100000111110011011010	1,09375	1,2109375	2,12890625	0,4040
60	101011101001111101111110	1,69921875	1,55273438	1,23046875	0,6360
61	101010110001001010100000	1,66992188	0,17578125	1,5625	1,0620
62	001000000000001111110101	0,3125	0,02929688	2,39257813	0,7890
63	101001100100011000011000	1,62109375	0,68359375	0,234375	0,1980

Continuación del apéndice 1.

64	001100110000100110001111	0,49804688	0,08789063	1,39648438	0,3090
65	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
66	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
67	101100111001010101111010	1,74804688	1,45507813	1,19140625	0,1940
68	010010011000010001101010	0,71289063	1,2890625	1,03515625	1,0090
69	001111100000001011111110	0,60546875	0,01953125	2,48046875	0,9990
70	101100101001000101110100	1,73828125	1,41601563	1,1328125	1,1540
71	101011100100111000010000	1,69921875	0,76171875	0,15625	0,5750
72	001101000000111110000000	0,5078125	0,14648438	1,25	3,0330
73	011101000111100111011010	1,1328125	1,18164063	2,12890625	0,8480
74	101010111001011001110000	1,66992188	1,46484375	1,09375	1,8900
75	001011010000110011111011	0,43945313	0,1171875	2,45117188	0,7200
76	101000000100011100010101	1,5625	0,69335938	0,20507813	1,3370
77	101011100001101110101110	1,69921875	0,26367188	1,69921875	0,6780
78	10010000000100010111010	1,40625	0,078125	1,81640625	0,2390
79	101100111001110101111111	1,74804688	1,53320313	1,24023438	0,5190
80	010101101000001001101000	0,83984375	1,26953125	1,015625	0,6710
81	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
82	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
83	101100111001010101111010	1,74804688	1,45507813	1,19140625	0,1940
84	010001001000111100100000	0,6640625	1,39648438	0,3125	1,2290
85	001110110000011010110000	0,57617188	0,05859375	1,71875	1,1450
86	101100001001011100110101	1,71875	1,47460938	0,51757813	0,8920
87	100100100000000111110100	1,42578125	0,00976563	2,3828125	1,3840
88	101110011001010000111010	1,80664063	1,4453125	0,56640625	0,8420
89	101011100100001001011110	1,69921875	0,64453125	0,91796875	0,7550
90	010101001000100100101010	0,8203125	1,33789063	0,41015625	1,2570
91	101011010001110011101011	1,68945313	0,2734375	2,29492188	1,2850
92	001011100000101110111110	0,44921875	0,10742188	1,85546875	1,2130
93	011101100111001010011000	1,15234375	1,11328125	1,484375	0,7690
94	001111100000111010110000	0,60546875	0,13671875	1,71875	1,3320
95	010000111000110100101111	0,65429688	1,37695313	0,45898438	0,5840

Continuación del apéndice 1.

96	101100001001100000111010	1,71875	1,484375	0,56640625	0,3880
97	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
98	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
99	101100111001010101111010	1,74804688	1,45507813	1,19140625	0,1940
100	010000101000000101100000	0,64453125	1,25976563	0,9375	0,9650
101	001111100000111011110100	0,60546875	0,13671875	2,3828125	0,4910
102	101111011001110001111111	1,84570313	1,5234375	1,24023438	0,1530
103	101101001001100100111110	1,7578125	1,49414063	0,60546875	0,9240
104	010001001000111100100100	0,6640625	1,39648438	0,3515625	2,3600
105	101011100100101101011010	1,69921875	0,73242188	0,87890625	0,4340
106	011110110111011010010100	1,20117188	1,15234375	1,4453125	1,1170
107	101100001001011100110001	1,71875	1,47460938	0,47851563	1,2190
108	101110011001010000111110	1,80664063	1,4453125	0,60546875	1,0390
109	001101100000001010111100	0,52734375	0,01953125	1,8359375	0,6370
110	001011100000001010111010	0,44921875	0,01953125	1,81640625	1,0040
111	010000111000110100101011	0,65429688	1,37695313	0,41992188	0,4720
112	010100001000100000101110	0,78125	1,328125	0,44921875	0,6340
113	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
114	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
115	101111011001110001111111	1,84570313	1,5234375	1,24023438	0,1530
116	010001001000111101110100	0,6640625	1,39648438	1,1328125	0,4560
117	001100000000011111100001	0,46875	0,06835938	2,19726563	2,4790
118	101110111001011001100100	1,82617188	1,46484375	0,9765625	1,4410
119	101110011001010001101110	1,80664063	1,4453125	1,07421875	2,1880
120	101011100100001001001010	1,69921875	0,64453125	0,72265625	0,4960
121	010000101000000100110000	0,64453125	1,25976563	0,46875	1,2560
122	001101000000100111101110	0,5078125	0,08789063	2,32421875	2,3500
123	010101101000001000111100	0,83984375	1,26953125	0,5859375	1,9870
124	001100000000100010101110	0,46875	0,078125	1,69921875	0,3410
125	101111101001111000100100	1,85546875	1,54296875	0,3515625	0,4440
126	010000111000110101111011	0,65429688	1,37695313	1,20117188	0,6520
127	001011100000101110101010	0,44921875	0,10742188	1,66015625	0,6710

Continuación del apéndice 1.

128	101100111001010100101010	1,74804688	1,45507813	0,41015625	0,3370
129	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
130	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
131	101111011001110001111111	1,84570313	1,5234375	1,24023438	0,1530
132	010000001000011100100001	0,625	1,31835938	0,32226563	0,6350
133	001101000000100110111110	0,5078125	0,08789063	1,85546875	0,3510
134	101110011001010000111110	1,80664063	1,4453125	0,60546875	0,4600
135	101101101001001001101100	1,77734375	1,42578125	1,0546875	0,5940
136	001110110000011011100100	0,57617188	0,05859375	2,2265625	0,6440
137	101100101001000101100000	1,73828125	1,41601563	0,9375	0,2070
138	010011101000101100111010	0,76171875	1,35742188	0,56640625	0,3510
139	101000110100110100001011	1,59179688	0,75195313	0,10742188	0,2430
140	010011101000001000111010	0,76171875	1,26953125	0,56640625	0,2740
141	001001000000111111100100	0,3515625	0,14648438	2,2265625	0,3980
142	010011101000111001110100	0,76171875	1,38671875	1,1328125	0,3540
143	101100001001100000101110	1,71875	1,484375	0,44921875	0,6060
144	010100111000010101111010	0,81054688	1,29882813	1,19140625	0,4810
145	010001011000001101101101	0,67382813	1,27929688	1,06445313	0,1350
146	001101010000010011110110	0,51757813	0,0390625	2,40234375	0,1450
147	101111011001110001111111	1,84570313	1,5234375	1,24023438	0,1530
148	010010111000011001101100	0,73242188	1,30859375	1,0546875	0,6860
149	00110000000011111111001	0,46875	0,06835938	2,43164063	0,8580
150	101100001001100001110110	1,71875	1,484375	1,15234375	1,2700
151	101101101001001001100100	1,77734375	1,42578125	0,9765625	1,2830
152	101000110100010100000010	1,59179688	0,67382813	0,01953125	0,3580
153	010010011000010000110110	0,71289063	1,2890625	0,52734375	0,4030
154	010001001000111100111100	0,6640625	1,39648438	0,5859375	0,7390
155	001111100000111010111100	0,60546875	0,13671875	1,8359375	0,5320
156	010001001000100101110110	0,6640625	1,33789063	1,15234375	0,3200
157	001011100000101111100010	0,44921875	0,10742188	2,20703125	0,2200
158	101111101001001000110010	1,85546875	1,42578125	0,48828125	0,4060
159	010100111000110101110011	0,81054688	1,37695313	1,12304688	0,1300
160	101100101001000101101000	1,73828125	1,41601563	1,015625	0,7720

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Mediciones para soluciones PID**

No	1er lugar	2do Lugar	3er Lugar	4to Lugar	5to Lugar
1	0	0	0	0	0
2	6	5	2	6	4
3	17	14	15	14	13
4	23	15	24	24	20
5	19	20	34	28	21
6	28	19	37	27	25
7	31	27	47	24	25
8	32	33	44	32	34
9	35	37	59	36	38
10	40	44	41	43	42
11	45	45	39	42	46
12	49	45	37	44	47
13	53	49	46	47	47
14	54	42	42	49	51
15	52	88	56	52	52
16	56	51	45	51	50
17	57	50	36	53	50
18	101	53	47	57	50
19	52	64	53	55	52
20	57	125	53	54	63
21	57	51	56	55	55
22	57	54	58	58	58
23	59	43	66	60	57
24	59	58	33	57	59
25	60	59	17	58	61
26	57	53	63	57	58
27	61	51	51	50	62
28	55	64	63	57	60
29	55	61	64	58	58
30	60	59	42	60	59
31	59	57	59	59	55
32	58	58	59	60	60
33	59	62	61	58	54
34	54	62	61	55	55
35	52	61	61	62	52
36	60	65	45	52	56
37	60	64	57	66	60
38	60	44	60	60	59
39	61	45	60	63	52

Continuación del apéndice 2

40	62	65	61	69	60
41	60	113	62	48	59
42	58	63	51	44	57
3	44	59	33	64	52
44	105	47	61	63	57
45	54	58	63	47	58
46	59	54	55	45	55
47	55	49	56	64	53
48	53	62	46	63	60
49	51	61	48	67	59
50	54	65	57	42	48
51	51	48	60	65	55
52	59	66	58	63	60
53	53	22	60	62	63
54	50	65	61	99	62
55	50	66	60	61	58
56	50	37	62	60	57
57	49	63	49	58	51
58	53	62	61	58	56
59	49	69	46	57	55
60	49	63	54	57	56
61	48	36	55	57	53
62	49	65	55	57	56
63	51	64	58	50	58
64	52	63	58	57	58
65	52	62	57	54	57
66	52	63	55	57	58
67	55	113	62	60	53
68	54	62	60	62	54
69	48	54	61	63	47
70	96	59	60	52	52
71	51	56	59	52	53
72	51	60	61	60	51
73	51	59	59	60	54
74	50	63	56	56	53
75	51	58	56	55	54
76	52	61	55	61	56

Continuación del apéndice 2.

77	53	62	64	56	52
78	64	61	53	52	59
79	49	62	57	54	57
80	49	61	59	63	54
81	49	58	60	58	52
82	49	56	57	57	57
83	49	56	57	51	49
84	48	94	59	55	51
85	49	55	57	61	51
86	48	54	57	44	51
87	47	57	53	56	53
88	48	57	55	56	52
89	51	57	47	55	51
90	48	56	54	61	55
91	48	57	52	57	53
92	49	55	56	56	53
93	45	104	54	55	55
94	49	53	54	52	51
95	41	50	56	57	51
96	99	53	48	55	50
97	46	53	48	55	52
98	51	52	49	54	49
99	46	52	48	55	51
100	49	53	49	54	54
101	45	85	38	49	52
102	48	54	53	56	53
103	48	51	48	51	55
104	141	54	49	52	54
105	48	54	51	52	54
106	50	53	50	60	55
107	51	50	53	51	50
108	51	63	51	56	50
109	48	50	57	51	50
110	49	46	53	53	50
111	47	48	51	55	51
112	50	50	49	54	51
113	48	50	52	52	52
114	49	53	51	53	51
115	51	52	51	51	54
116	52	51	49	51	55



Continuación del apéndice 2.

17	53	52	52	51	52
118	52	51	53	51	53
119	50	91	53	54	52
120	54	50	53	55	48
121	52	46	55	56	52
122	95	48	55	52	50
123	52	45	57	52	50
124	48	49	54	54	50
125	47	47	54	53	54
126	48	50	55	49	52
127	48	51	52	52	51
128	50	53	54	49	53
129	52	50	53	51	57
130	52	54	53	49	54
131	53	55	56	50	55
132	48	54	55	58	54
133	52	47	57	53	53
134	53	46	59	56	52
135	49	50	57	53	51
136	46	47	58	53	52
137	59	50	56	50	50
138	47	50	55	54	53
139	48	52	56	50	51
140	48	53	55	50	48
141	50	51	57	50	47
142	52	51	55	50	51
143	48	54	52	48	50
144	49	53	56	50	51
145	48	97	55	52	50
146	48	55	57	53	46
147	49	48	58	50	49
148	83	49	60	53	47
149	40	48	59	53	50
150	44	49	56	55	45

Fuente: elaboración propia.

