

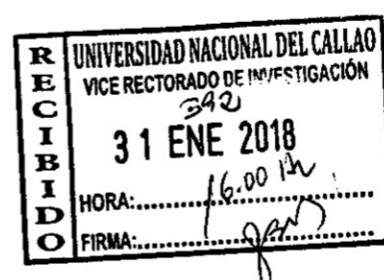


FEV 2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“IDENTIFICACIÓN DEL MODELO Y CONTROL DE
VELOCIDAD DE UN MOTOR DC ALIMENTADO
MEDIANTE PANEL SOLAR”

AUTOR: M. SC., ING. NICANOR RAÚL, BENITES SARAVIA

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01/11/2015 al 31/10/2017)

(RESOLUCIÓN RECTORAL N° 820-2015-R)

CALLAO, (2017)

I.	ÍNDICE	1
1.1	ÍNDICE DE FIGURAS	4
1.2	ÍNDICE DE TABLAS	7
II.	RESUMEN y ABSTRACT	8
III.	INTRODUCCIÓN	10
3.1	Planteamiento del Problema de Investigación	10
3.2	Objetivos y Alcances de la Investigación	11
3.2.1	Objetivos	11
3.2.2	Alcances	11
3.3	Importancia y Justificación de la Investigación	12
3.3.1	Importancia	12
3.3.2	Justificación	13
3.4	Formulación de la Hipótesis	13
3.4.1	Hipótesis general	13
3.4.2	Hipótesis específicas	13
IV.	MARCO TEÓRICO	15
4.1	Energía Solar Fotovoltaica	15
4.2	Identificación de Sistemas	17
4.2.1	El proceso de identificación	18
4.2.2	Métodos de identificación	20
4.2.3	Identificación no paramétrica	21
4.2.4	Identificación paramétrica	22
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1	Modelado del Panel Solar Fotovoltaico	24
5.1.1	Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) en el punto de máxima potencia	26
5.1.2	Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) mediante las ecuaciones de corriente y voltaje	28
5.2	Diseño del regulador de carga para la alimentación del motor DC	31

5.2.1	Diseño del convertidor DC/DC Buck	31
5.2.2	Diseño del Control PID del convertidor DC/DC Buck	34
5.3	Identificación del modelo del motor DC con encoder óptico	38
5.3.1	Identificación no paramétrica del motor DC con encoder Óptico	38
5.3.2	Identificación paramétrica del motor DC con encoder óptico	45
5.4	Diseño del Sistema de Control PID de velocidad del motor DC	49
5.4.1	Introducción	49
5.4.2	Diseño del Controlador PID	49
5.5	Diseño del Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)	52
5.5.1	Introducción	52
5.5.2	Determinación del Modelo de Referencia	53
5.5.3	Determinación de la Ley de Control	53
5.6	Implementación del hardware utilizado para el control de Velocidad	54
5.7	Implementación del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) a nivel de software	59
5.8	Implementación del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de software	60
VI	RESULTADOS	61
6.1	Resultados del modelado del panel solar	61
6.2	Resultados de la implementación del sistema de alimentación con Panel Solar	62
6.3	Resultados de la identificación del modelo del motor DC	64
6.4	Resultados de la simulación del Control PID de velocidad del motor DC	69
6.5	Resultados de la simulación del Control MRAC de velocidad del motor DC	70

6.6	Resultados del Control PID de velocidad del motor DC en tiempo real	71
6.7	Resultados del Control MRAC de velocidad del motor DC en tiempo real	71
VII	DISCUSION	73
7.1	Comparación de resultados	73
7.2	Conclusiones y recomendaciones	74
VIII	REFERENCIALES	76
IX	APÉNDICES	78
	APÉNDICE A	78
	Programa en Matlab de Control Proporcional Integral Derivativo (PID) (Autoría propia)	78
	APÉNDICE B	79
	Programa en Matlab de Control por Modelo de Referencia (MRAC) (Autoría propia)	79
X	ANEXOS	80
	• Matriz de Consistencia	80

Jr

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 4.1 Componentes de una instalación fotovoltaica	15
Figura N° 4.2 Proceso de identificación	19
Figura N° 4.3 Diagrama de bloques para cada modelo	23
Figura N° 5.1 Panel solar	25
Figura N° 5.2 Circuito eléctrico de la celda fotovoltaica con carga	25
Figura N° 5.3 Circuito eléctrico del panel fotovoltaico con carga	27
Figura N° 5.4 Circuito eléctrico equivalente del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia con carga	27
Figura N° 5.5 Diagrama eléctrico del panel fotovoltaico con capacitor	29
Figura N° 5.6 Esquema de un convertidor DC/DC Buck	31
Figura N° 5.7 Modos de operación del convertidor DC/DC Buck	33
Figura N° 5.8 Esquema en lazo cerrado del convertidor Buck	35
Figura N° 5.9 Diagrama esquemático del convertidor DC/DC Buck	36
Figura N° 5.10 Arduino Nano V3.0	37
Figura N° 5.11 Módulo LM2596 (convertidor Buck DC)	37
Figura N° 5.12 Convertidor DC/DC Buck	37
Figura N° 5.13 Lectura del convertidor DC/DC Buck	38
Figura N° 5.14 Componentes del sistema de adquisición, tratamiento de datos e identificación	39
Figura N° 5.15 Circuito driver de potencia	39
Figura N° 5.16 Circuito sensor y convertidor F/V	40
Figura N° 5.17 Aspecto físico de la tarjeta de adquisición De datos NI USB 6008	40
Figura N° 5.18 Programa en LabVIEW para la adquisición e Identificación del modelo del motor DC	41
Figura N° 5.19 Gráfica de velocidad vs tiempo	42
Figura N° 5.20 Ventana del Toolbox de identificación de Matlab	42
Figura N° 5.21 Selección de la opción Time Domain data	43

Figura N° 5.22 Ventana de configuración e importación de los datos	43
Figura N° 5.23 Selección de la opción Process Model	44
Figura N° 5.24 Ventana de configuración de polos y ceros, así como la selección del retardo, entre otros	44
Figura N° 5.25 Resultados de la ejecución, en el que se aprecian los parámetros del modelo del motor DC	45
Figura N° 5.26 Selección del modelo polinomial (paramétrico)	46
Figura N° 5.27 Configuración de la estructura ARX	46
Figura N° 5.28 Respuesta de la estructura ARX (color verde)	47
Figura N° 5.29 Respuesta de la estructura OE	47
Figura N° 5.30 Estructura polinomial en tiempo discreto del ARX	48
Figura N° 5.31 Estructura polinomial en tiempo discreto del OE	48
Figura N° 5.32 Diagrama de bloques del Control PID acoplado a la planta	50
Figura N° 5.33 Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia	52
Figura N° 5.34 Tarjeta DAQ USB 6008	54
Figura N° 5.35 Módulo L298 (driver de potencia)	55
Figura N° 5.36 Esquema del módulo L298 (driver de potencia)	55
Figura N° 5.37 Circuito sensor de velocidad	56
Figura N° 5.38 Chip SG63525 (Generador PWM)	56
Figura N° 5.39 Motor DC Globe Motors con encoder óptico acoplado	57
Figura N° 5.40 Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware para el control de velocidad del motor DC	58
Figura N° 5.41 Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware del Control PID de velocidad del motor DC	59
Figura N° 5.42 Gráfica de Control de velocidad PID del motor DC	59
Figura N° 5.43 Diagrama de bloques en LabVIEW	60
Figura N° 6.1 Respuesta V-I del panel fotovoltaico	61
Figura N° 6.2 Respuesta P-V del panel fotovoltaico	62
Figura N° 6.3 Esquema del Control PID del convertidor Buck	

en Simulink	62
Figura N° 6.4 Voltaje de salida del convertidor Buck en Simulink	63
Figura N° 6.5 Corriente del ciclo de carga del convertidor Buck en Simulink	63
Figura N° 6.6 Lectura del convertidor DC/DC Buck	64
Figura N° 6.7 Resultado gráfico del proceso de identificación	65
Figura N° 6.8 Respuesta del modelo a una entrada escalón unitario	65
Figura N° 6.9 Representación del motor DC	66
Figura N° 6.10 Diagrama de bloques representativo del modelo de función de transferencia del motor DC	69
Figura N° 6.11 Respuesta del Sistema de Control PID frente a una entrada escalón unitario	70
Figura N° 6.12 Respuesta del Sistema MRAC de velocidad del motor DC	70
Figura N° 6.13 Salida controlada (velocidad del motor: amarillo) vs setpoint (velocidad de referencia: rojo)	71
Figura N° 6.14 Salida controlada (velocidad del motor: rojo) vs setpoint (velocidad de referencia: amarillo)	71

del

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 4.1 Estructura de los modelos paramétrico	23
Tabla N° 5.1 Características eléctricas del panel solar monocristalino SFM 90W de Singfo Solar Energy Sci & Tech Co, Ltd.	25
Tabla N° 5.2 Condiciones para modo continuo de conducción (MCC)	32
Tabla N° 7.1 Resumen de resultados de simulación de las dos técnicas de control	73
Tabla N° 7.2 Resumen de resultados de las dos técnicas de control en tiempo real	74

Aut.

II. RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se aborda el diseño y la implementación de un sistema control de velocidad de un motor DC alimentado por un regulador de carga tipo Buck, el cual tiene como entrada un panel solar de 90 Watts.

Entendiendo que en muchas aplicaciones de control de velocidad o de posición de motores, se exige que dicho control sea preciso, se ha optado por identificar el modelo del motor DC, usando para ello las herramientas de hardware y software disponibles, lo que ha permitido implementar las técnicas de Control Proporcional Integral Derivativo (PID) y el Control por Modelo de Referencia (MRAC), a nivel de simulación y en tiempo real, para lo cual se han usado Arduino, LabVIEW y Matlab.

Asimismo, considerando utilizar recursos de energías renovables, con la consiguiente ventaja de tener un sistema de alimentación autónoma, se optó por implementar un sistema de alimentación con panel solar fotovoltaico y un regulador de carga, que ha permitido generar una tensión DC de 12 voltios regulados, que alimentan al motor DC.

Los resultados muestran que la técnica de Control por Modelo de Referencia presenta mejores resultados, incluso para referencias variantes (trayectorias).

PALABRAS CLAVES: Panel Solar, Regulador de carga Buck, Motor DC, Control PID y MRAC

II. ABSTRACT

In the present research work, the design and implementation of a speed control system of a DC motor fed by a Buck type charge regulator, which has as input a 90 Watts solar panel is approached.

Understanding that in many applications of speed control or motor position, it is required that this control is accurate, we have chosen to identify the model of the DC motor, using the available hardware and software tools, which has allowed to implement the techniques of Integral Derivative Proportional Control (PID) and Control by Reference Model (MRAC), at simulation level and in real time, for which Arduino, LabVIEW and Matlab have been used.

Also, considering using renewable energy resources, with the consequent advantage of having an autonomous power system, it was decided to implement a power system with photovoltaic solar panel and a charge controller, which has allowed to generate a DC voltage of 12 volts regulated, that feed the DC motor.

The results show that the technique of Control by Reference Model presents better results, even for variable references (trajectories).

KEYWORDS: Solar Panel, Buck Charge Controller, DC Motor, PID Control and MRAC

III. INTRODUCCION

3.1 Planteamiento del Problema de Investigación

En muchas aplicaciones, el control de motores DC implica por un lado la exactitud en el control de velocidad o posición, y ello exige diseñar un controlador adecuado, y este a su vez necesita contar con un modelo muy cercano al comportamiento real. Determinar el modelo matemático mediante métodos analíticos, exige conocer sus parámetros, como la inercia, constante de torque, resistencia de armadura o de campo, etc. Algunos fabricantes tienen disponibles dicha información; sin embargo, no siempre se puede encontrar información, particularmente cuando se tiene un motor cuya descripción del fabricante o modelo no está disponible o se ha borrado.

Otro de los problemas que se presenta en el control de motores o de cualquier otra aplicación, es que la energía que se consume proviene de energías fósiles, así como el incremento del costo, a lo que hay que sumarle el aumento de la contaminación ambiental, situación que estaría contraviniendo las recomendaciones de mitigar el efecto invernadero.

La necesidad de contar con un modelo muy cercano al comportamiento real del motor DC, diseñar e implementar algoritmos de control adecuados para el control de velocidad o de posición de alto desempeño; así como disponer de fuentes de energía renovables para el control del motor DC, conduce a formular soluciones viables y técnicamente confiables. Particularmente en este trabajo, se trata del control de velocidad de un motor DC con encoder óptico.

En consecuencia, el problema a resolver, se puede dividir en sub-problemas: modelar e implementar el sistema de alimentación con panel solar, identificar el modelo del motor, diseñar e implementar controladores

PI y Adaptivo (que permita comparar sus desempeños). En tal sentido, es que se plantea la siguiente problemática:

¿Es posible modelar e implementar un sistema de alimentación con panel solar, identificar el modelo del motor DC, diseñar e implementar un Controlador Adaptivo que permita un mejor desempeño que un Controlador PID?

3.2 Objetivos y Alcances de la Investigación

3.2.1 Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es diseñar e implementar controladores de velocidad de un motor DC, alimentado mediante panel solar.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- b1. Modelar e implementar un sistema de alimentación con panel solar.
- b2. Identificar el modelo de un motor DC.
- b3. Diseñar e implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC y simular sus respuestas en lazo cerrado.
- b4. Implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC en tiempo real y analizar sus respuestas en lazo cerrado.

3.2.2 Alcances

La implementación del presente trabajo de investigación beneficiará a alumnos y docentes del área de Control, permitiendo fomentar la investigación en temas de identificación de sistemas dinámicos y energías

renovables. La investigación es básica y su codificación de acuerdo a la UNESCO es 04030601.

3.3 Importancia y Justificación de la Investigación

3.3.1 Importancia

Este proyecto surge con motivo de fomentar el uso de energías renovables en aplicaciones de Control Automático de Procesos o Plantas diversas.

En sistemas más complejos, como plantas de múltiples entradas y múltiples salidas (sistemas multivariables), la tarea de diseñar controladores se vuelve complicada, debido a que se tiene que contar con modelos precisos de la planta a ser controlada; sin embargo, modelar dichas plantas en forma analítica se vuelve difícil, incluso en determinados sistemas univariados de relativa complejidad. En tal sentido, una de las opciones a considerar es obtener mediante métodos experimentales el modelo del proceso o planta, denominados métodos de identificación de sistemas dinámicos.

Existen métodos paramétricos y no paramétricos de identificación del modelo de plantas o procesos, mediante los cuales podemos usar los datos adquiridos del procedimiento experimental y usarlos para obtener el modelo requerido. Dicho modelo resultará más cercano al comportamiento real del sistema, y permitirá diseñar el controlador o controladores en forma más exacta.

Por otro lado, entre los algoritmos de control podemos encontrar algoritmos de control clásicos como los PID, y algoritmos modernos de mayor rendimiento como los Óptimos, Adaptivos, Predictivos, etc. Estos últimos son generalmente más precisos y óptimos.

H.E.2: "El proceso de identificación del modelo del motor DC, permitirá obtener una respuesta de velocidad muy cercana al comportamiento real del motor".

H.E.3: "El diseño de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar a nivel de simulación la velocidad del modelo del motor DC en lazo cerrado.

H.E.4: "La implementación de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar la velocidad del motor DC en lazo cerrado y en tiempo real.

En consecuencia, las variables que se operan son las siguientes:

Variables dependientes:

- Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica
- Velocidad del motor sin carga y con carga

Variables independientes:

- Energía solar fotovoltaica generada por el panel solar
- Señal de control generada por el controlador de velocidad

IV. MARCO TEÓRICO

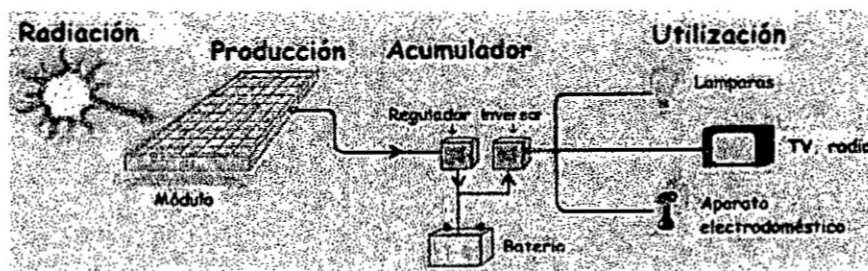
4.1 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías de energía renovable más populares, ya que utiliza la energía que recibimos del sol, la cual se encuentra disponible prácticamente en cualquier lugar. Una celda solar fotovoltaica, con base en el efecto fotoeléctrico convierte la energía que recibe del sol en energía eléctrica.

Estas celdas o colectores son semiconductores sensibles a la luz solar; de manera que cuando se expone a esta, se produce en las celdas una circulación de corriente eléctrica entre sus dos caras. Los componentes de un sistema fotovoltaico dependen del tipo de aplicación conectada o no a la red y de las características de instalación [6]. Una instalación fotovoltaica aislada está formada por los equipos destinados a producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica, según se puede apreciar en la Figura N° 4.1, y que brevemente se anotan a continuación:

Figura N° 4.1

Componentes de una instalación fotovoltaica.



Fuente: Díaz Narvaez, Díez Cardona [6]

✓ Celdas Fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica es donde se produce la conversión fotovoltaica.

Las más utilizadas son las realizadas con silicio cristalino. La incidencia de la radiación luminosa sobre la celda genera una diferencia de potencial y una corriente continua aprovechable. Actualmente se fabrican celdas solares con una eficiencia mayor al 30%. La energía solar fotovoltaica es principalmente utilizada como una fuente de energía alternativa para sistemas eléctricos residenciales o industriales. Además, otra aplicación importante del uso de esta fuente de energía es en los sistemas de transporte, ésta aplicación se ha dado a conocer en los vehículos eléctricos alimentados por paneles solares los cuales son mencionados a menudo como una alternativa a los vehículos de combustión interna.

✓ **Paneles fotovoltaicos**

Son un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí mediante configuraciones serie, paralelo o serie-paralelo, dependiendo si se quiere incrementar el voltaje, corriente o ambas. La orientación de los paneles solares de acuerdo a la ubicación y latitud se realiza buscando una mayor radiación de la energía solar sobre los paneles solares y mejorar su eficiencia.

✓ **Regulador de carga o convertidor DC/DC**

Tiene por función proteger a las baterías contra las sobrecargas y las descargas, produciendo una diferencia de potencial (voltaje) estable a la salida del convertidor DC/DC.

✓ **Baterías**

Son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica. Estas pueden cargarse de energía en el día y descargarse en la noche.

✓ **Inversor**

Convierte la tensión o voltaje DC regulada (12, 24 o 48 voltios) y lo convierte a tensión AC (220 voltios a 60 Hz.). El dimensionamiento de una

de

instalación aislada requiere disponer de información relativa al consumo previsto de energía y de la disponibilidad media de radiación solar a lo largo del año.

4.2 Identificación de Sistemas

En muchas ocasiones, puede ser difícil o dificultoso obtener el modelo matemático de un proceso o planta, particularmente si el proceso es complejo o no se conocen sus características. Tener un modelo matemático muy cercano al sistema físico es de vital importancia, debido a que en función de dicho modelo diseñaremos el controlador correspondiente y verificaremos si la respuesta del sistema de control en lazo cerrado sigue a una consigna o referencia. En tal sentido, podemos anotar que existen dos métodos de identificación de modelos:

- **Modelado teórico**

Viene a ser un método analítico, en el que se recurre a las leyes físicas para describir el comportamiento dinámico de un proceso físico.

- **Identificación del sistema**

Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos del proceso o planta en estudio. Dicho modelo debe reproducir con suficiente exactitud, las características dinámicas del sistema físico en estudio [8].

El modelado teórico tiene un campo de aplicación restringido a procesos muy sencillos de modelar, o a aplicaciones en que no se requiera gran exactitud en el modelo obtenido. En muchos casos, la estructura del modelo obtenido a partir del conocimiento físico de la planta posee un conjunto de parámetros desconocidos y que solo se pueden determinar

experimentando sobre el sistema real. De allí la necesidad de recurrir a los métodos de identificación de sistemas.

4.2.1 El proceso de identificación

En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:

1. Obtención de datos de entrada – salida

Para ello se debe excitar al sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.

2. Tratamiento previo de los datos registrados

Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de “preparar” los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.

3. Elección de la estructura del modelo

En esta parte es necesario considerar si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, entonces el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

4. Obtención de los parámetros del modelo

Prosiguiendo, se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

5. Validación del modelo

Finalmente, el último paso es determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en

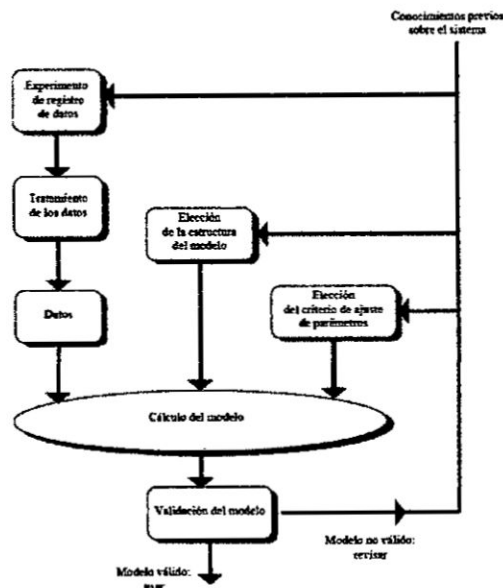
ms

cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el punto correspondiente. Por tanto, el proceso de identificación es un proceso iterativo, cuyos pasos pueden observarse en el organigrama de la Figura 4.2.

Figura N° 4.2
Proceso de identificación



Fuente: López G. [8]

4.2.2 Métodos de identificación

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios:

- ❖ Dependiendo del tipo de modelo obtenido:

1. Métodos no paramétricos

Permiten obtener modelos no paramétricos del sistema bajo estudio. Algunos de estos métodos son: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier, etc.

2. Métodos paramétricos

Permiten obtener modelos paramétricos. Estos métodos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y por último de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

- ❖ Dependiendo de la aplicación:

1. Métodos de identificación off-line (a posteriori)}

Utilizados en aquellas aplicaciones en que no se requiera un ajuste continuado del modelo. En estos casos, se realiza la identificación previa de la planta, considerándose que la validez de los parámetros obtenidos no se verá alterada con el paso del tiempo.

2. Métodos de identificación on-line (identificación recursiva)

Utilizados en aquellas aplicaciones en las que los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos de entrada-salida obtenidos durante la evolución del proceso. Son muy utilizados en sistemas de Control Adaptivo o Adaptativo.

3. Dependiendo del criterio de ajuste de los parámetros

Existen diversos métodos matemáticos para ajustar los parámetros de una estructura a un conjunto de datos de entrada-salida. Algunos de los más utilizados en el campo de la identificación son el método de mínimos cuadrados y el método de las variables instrumentales.

4.2.3 Identificación no paramétrica

Se pueden clasificar en:

- **Identificación no paramétrica en el dominio del tiempo**

Mediante esta técnica de identificación se pretende obtener la respuesta al impulso del sistema, o bien la respuesta al escalón del mismo (pudiendo obtenerse esta última mediante una integración de la primera). Para ello, debe registrarse la evolución temporal de la salida del sistema tras la aplicación de una señal impulso o escalón. Obviamente, la imposibilidad de conseguir este tipo de señales en la práctica, lleva a utilizar un método indirecto para obtener la respuesta impulsiva, conocido como análisis de correlación.

- **Identificación no paramétrica en el dominio de la frecuencia**

En este caso, el modelo resultante es una representación de la respuesta en frecuencia del sistema, obtenida mediante la aplicación de señales de entrada sinusoidales de distintas frecuencias. Cuando no sea posible aplicar este tipo de entradas, puede recurrirse a la aplicación de un ruido blanco, que permite obtener la respuesta en frecuencia mediante el conocido análisis espectral. Este análisis se basa en la realización de la transformada de Fourier de las funciones de covarianza de la entrada y la salida y la correlación entre la entrada y la salida.

De estas dos técnicas, se utilizará la identificación no paramétrica en el dominio del tiempo, particularmente la respuesta al escalón.

4.2.4 Identificación paramétrica

Los modelos paramétricos a diferencia de los anteriores, quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salida y perturbaciones). En muchas ocasiones es necesario realizar la identificación de un sistema del cual no se tiene ningún tipo de conocimiento previo. En estos casos, se suele recurrir a modelos estándar, cuya validez para un amplio rango de sistemas dinámicos ha sido comprobada experimentalmente. Generalmente estos modelos permiten describir el comportamiento de cualquier sistema lineal. La dificultad radica en la elección del tipo de modelo (orden del mismo, número de parámetros, etc.) que se ajuste satisfactoriamente a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

Se pueden clasificar en:

- **Modelos paramétricos en el dominio discreto**

En este caso, los datos que sirven de base para la identificación se obtienen por muestreo. Es el más usado.

- **Modelos paramétricos en el dominio continuo**

No es muy frecuente; sin embargo, siempre es posible realizar una transformación del dominio discreto al continuo o viceversa.

Entre los tipos de modelos basados en una determinada estructura, podemos encontrar a los modelos: ARX, OE (Output Error), ARMAX, BJ (Box Jenkins), como se puede apreciar en la Tabla N° 4.1.

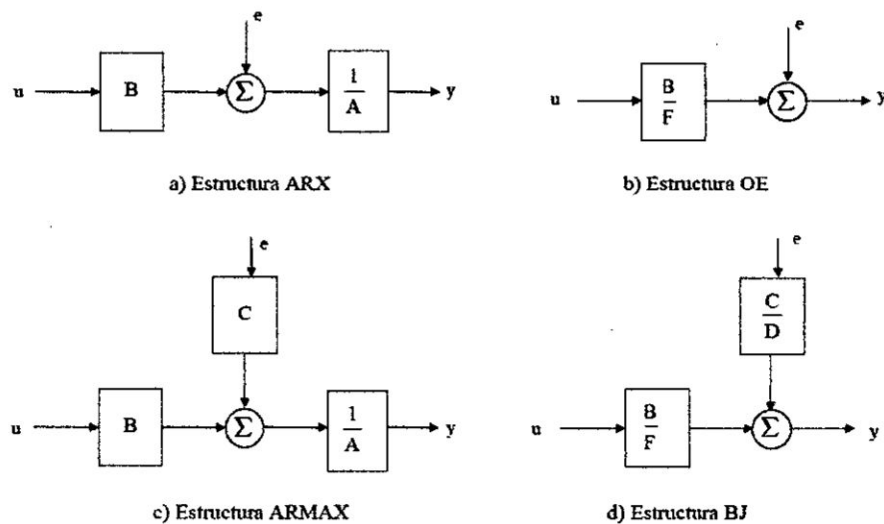
Tabla N° 4.1
Estructuras de los modelos paramétricos

Tipo de modelo	Condición	Estructura resultante
Modelo ARX	$F(q^{-1})=D(q^{-1})=C(q^{-1})=1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t)$
Modelo Output Error (OE)	$C(q^{-1})=D(q^{-1})=A(q^{-1})=1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + e(t)$
Modelo ARMAX	$F(q^{-1})=D(q^{-1})=1$	$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + C(q^{-1}) \cdot e(t)$
Modelo Box Jenkins (BJ)	$A(q^{-1})=1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t)$

Fuente: López G., Martínez B. [8][10]

En la Figura N° 4.3 se presenta el diagrama de bloques correspondiente a cada uno de los modelos paramétricos de la Tabla N° 4.1.

Figura N° 4.3
Diagrama de bloques para cada modelo



Fuente: López G. [10]

V. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada es la siguiente:

2. Modelado del Panel Solar Fotovoltaico.
3. Diseño del regulador de carga para la alimentación del motor DC.
4. Identificación del modelo del motor DC con encoder óptico
5. Diseño del Sistema de Control PID de velocidad del motor DC
6. Diseño del Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)
7. Implementación del hardware utilizado para el control de velocidad
8. Implementación del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) a nivel de software.
9. Implementar del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de software.
10. Efectuar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

5.1 Modelado del Panel Solar Fotovoltaico

En esta subsección se aborda el modelado del panel solar fotovoltaico SFM 90W, y para ello se ha considerado la hoja de especificaciones proporcionada por el fabricante Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., Ltd, tal como se muestra en la Tabla N° 5.1.

En la Figura N° 5.1 (a) y 5.1 (b) se muestran fotografías del panel solar SFM 90W de la parte frontal y posterior.

El modelo de la celda fotovoltaica, se puede representar mediante el circuito de la figura N° 5.2.

Tabla N° 5.1

Características eléctricas del panel solar monocristalino
SFM 90W de Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., Ltd

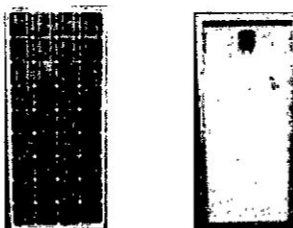
Potencia máxima (P_{max})	90W
Voltaje en P_{max} (V_{mpp})	18.1V
Corriente en P_{max} (I_{mpp})	4.98A
Corriente en corto circuito (I_{sc})	5.47A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	21.8V
Rango de temperatura	-40 a 85°C

Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.1

Panel solar

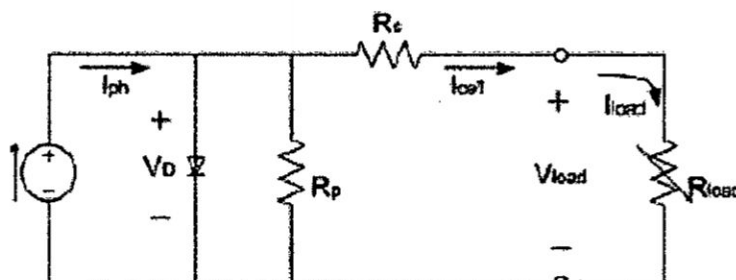
(a) Vista frontal, (b) Vista posterior del panel fotovoltaico



Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.2

Circuito eléctrico de la celda fotovoltaica con carga



Fuente: Autoría propia

Siendo R_s la resistencia en serie que se conecta con la carga y R_p la resistencia de los cristales de la unión pn que constituyen la celda solar fotovoltaica.

El modelo eléctrico de la celda solar fotovoltaica se puede expresar matemáticamente por la ecuación 5.1, así:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q}{AKT}(V_{load} + I_{cell}R_s)} - 1 \right] - \left(\frac{V_{load} + I_{cell}R_s}{R_p} \right) \quad (5.1)$$

Siendo:

I_{cell} : Corriente de salida de la celda

I_{ph} : Corriente generada por la luz

I_0 : Corriente de saturación de la celda

q : Carga eléctrica

V_{load} : Voltaje de salida de la carga

A : Constantes ideales

K : Constante de Boltzmann

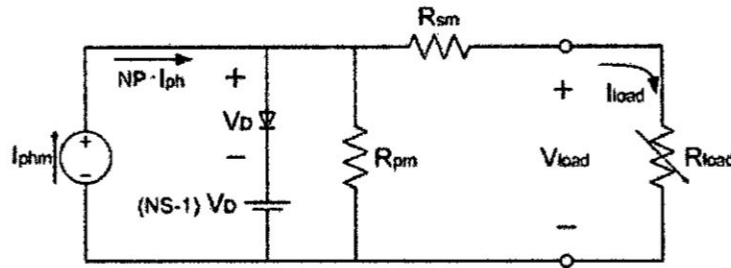
T : Temperatura de la celda en °K

5.1.1 Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (FV) en el punto de máxima potencia.

La agrupación de celdas fotovoltaicas en serie-paralelo forma el panel fotovoltaico, y se puede representar mediante el circuito de la Figura N° 5.3, donde R_{sm} es la resistencia en serie equivalente, R_{pm} es la resistencia en paralelo equivalente del panel, NP es el número de celdas en paralelo, NS es el número de celdas en serie e I_{phm} es la corriente suministrada por la fuente de corriente del panel solar.

Figura N° 5.3

Circuito eléctrico del panel fotovoltaico con carga

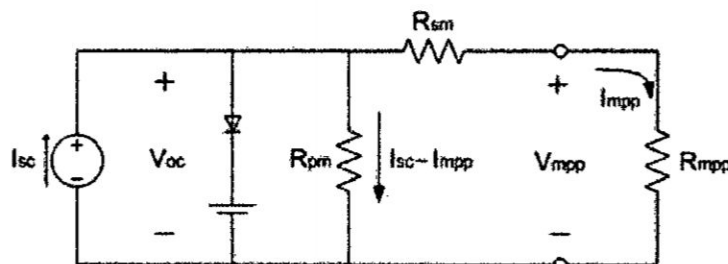


Fuente: Autoría propia

En el proceso de producción de energía se debe buscar siempre que sea posible el punto de máxima potencia. Para obtener el punto de máxima potencia, se considera que R_{pm} es mucho mayor que R_{sm} , la fuente de corriente del panel solar I_{phm} se puede aproximar a la corriente máxima en corto circuito I_{sc} (salida cortocircuitada) y el voltaje del diodo de polarización más el voltaje de la fuente $(NS-1)V_D$ se puede aproximar al voltaje máximo en circuito abierto V_{oc} (tensión en los terminales de conexión sin carga) [12]. Por consiguiente, el circuito eléctrico equivalente para operación en el punto de máxima potencia se presenta en la Figura N° 5.4.

Figura N° 5.4

Circuito eléctrico equivalente del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia con carga



Fuente: Autoría propia

De la Figura N° 5.4 se puede obtener las expresiones para R_{sm} y R_{pm} , representadas por las ecuaciones 5.2 y 5.3.

$$R_{sm} = \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{21.8V - 18.1V}{4.98A} = 0.74\Omega \quad (5.2)$$

$$R_{pm} = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{mpp}} = \frac{21.8V}{5.47A - 4.98A} = 44.49\Omega \quad (5.3)$$

De la Figura N° 5.4 se puede realizar los análisis de circuito abierto y cortocircuito.

✓ **Tensión a circuito abierto del generador**

Del circuito de la Figura N° 5.4 se puede obtener que:

$$V_{mpp} \approx R_{sm} V_{oc} \approx 0.74 V_{oc} \quad (5.4)$$

✓ **Corriente en cortocircuito del generador**

Asimismo, considerando que la corriente I_{sc} es igual a la suma de las corrientes que circulan por las resistencias R_{pm} y R_{sm} , tendremos:

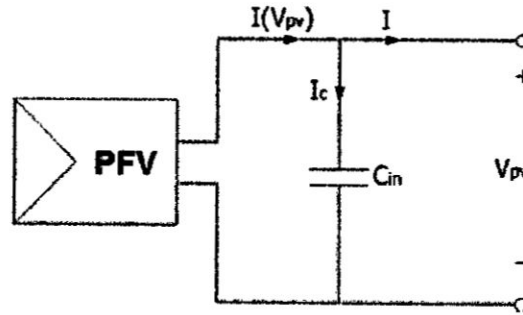
$$\begin{aligned} I_{sc} &= I_{R_{pm}} + I_{R_{sm}} \\ \Rightarrow V_{R_{pm}} &= V_{R_{sm}} \\ (I_{sc} - I_{mpp})R_{pm} &= R_{sm} \cdot I_{mpp} \\ I_{mpp} &= \frac{R_{pm}}{(R_{sm} + R_{pm})} I_{sc} ; \quad I_{mpp} = 0.9836 I_{sc} \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.1.2 Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) mediante las ecuaciones de corriente y voltaje.

Considerando las ecuaciones 5.2 a 5.5 y la conexión del capacitor C_{in} (ver Figura N° 5.5), se pueden obtener las ecuaciones 5.6 a 5.8,

considerando que la temperatura y la radiación solar es constante.

Figura N° 5.5
Diagrama eléctrico del panel fotovoltaico con capacitor



Fuente: Autoría propia

$$I(V_{pv}) = \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (5.6)$$

$$V_{pv}(I) = bV_{oc} \ln \left[\frac{I_{sc} - \left(I - I e^{-\left(\frac{1}{b}\right)} \right)}{I_{sc}} \right] + V_{oc} \quad (5.7)$$

$$P(V_{pv}) = V_{pv} I_{pv} = \frac{V_{pv} I_{sc} - V_{pv} I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (5.8)$$

Donde:

I: corriente suministrada por el panel

V_{pv}: voltaje de operación del panel

V_{oc}: voltaje del panel en circuito abierto

I_{sc}: corriente del panel en cortocircuito

b: constante característica del panel

P: potencia de salida del panel

Asimismo, el capacitor C_{in} conectado a los terminales del panel fotovoltaico, tiene la finalidad de que el panel funcione como una fuente de voltaje. A salida del panel se conectará un convertidor DC-DC, que permita regular el voltaje para alimentar al motor DC.

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{in}} (I(V_{pv}) - I) \quad (5.9)$$

Para obtener la ecuación de voltaje cuando el panel proporciona la máxima potencia, tenemos que calcular la derivada parcial de la potencia de salida del panel con respecto al voltaje V_{pv} , así:

$$\frac{\partial P}{\partial V_{pv}} = \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} - \frac{V_{pv} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{V_{oc} b - V_{oc} b e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}} = 0 \quad (5.10)$$

Resolviendo la ecuación 5.10, se obtiene la ecuación que describe el voltaje óptimo del panel, dado por:

$$V_{op} = V_{oc} + bV_{oc} \ln \left[b - b e^{-\left(\frac{1}{b}\right)} \right] \quad (5.11)$$

Por lo que V_{op} sustituye a V_{pv} en la ecuación 5.6 para obtener la corriente óptima en el panel. Por consiguiente, la potencia máxima del panel viene dada por:

$$P_{max} = V_{op} I_{op} = V_{op} \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{op} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (5.12)$$

La constante característica b del panel fotovoltaico, se obtiene despejando de la ecuación 5.12, según se muestra en la ecuación 5.13.

$$b = \frac{\frac{V_{op}}{V_{oc}} - 1}{L\eta \left[1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}} \right]} \quad (5.13)$$

Siendo:

I_{op} : corriente óptima en el punto de máxima potencia I_{mpp}

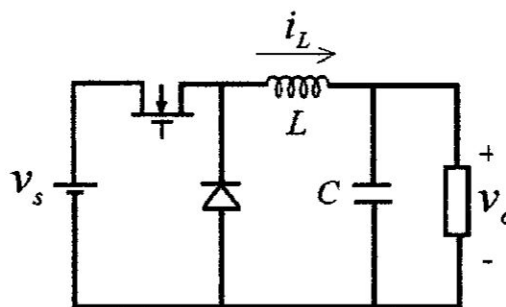
V_{op} : voltaje óptimo en el punto de máxima potencia V_{mpp} .

5.2 Diseño del regulador de carga para la alimentación del motor DC

5.2.1 Diseño del convertidor DC/DC Buck

El convertidor DC/DC Buck es uno que se encarga de reducir la tensión de entrada V_s a un nivel de tensión inferior o igual a V_o , el cual debe mantenerse constante si se supone un capacitor C muy grande en el filtro de salida. La Figura N° 5.6 muestra el convertidor Buck.

Figura N° 5.6
Esquema de un convertidor DC/DC Buck



Fuente: Campos D. [4]

La tensión de salida viene dada por:

$$v_o = Uv_s \quad (5.14)$$

El modelado matemático del convertidor Buck se realiza asumiendo que este trabaja en modo-continuo de conducción (MCC) [4], es decir la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor poseen un valor constante, y una parte fluctuante alrededor de un valor promedio. Esta condición de operación está ligada a los valores de la inductancia, la resistencia de carga del convertidor y a la frecuencia de conmutación, por la relación mostrada en la Tabla N° 5.2.

Tabla N° 5.2
Condiciones para modo continuo de
conducción (MCC)

Buck	Boost	Buck/Boost
$\frac{2Lf}{R} > (1-U)$	$\frac{2Lf}{R} > U(1-U)^2$	$\frac{2Lf}{R} > (1-U)^2$

Fuente: Campos D. [4]

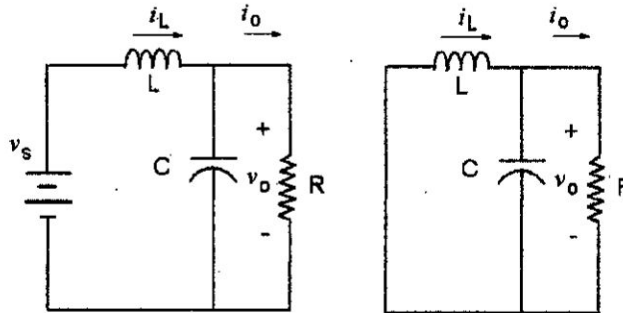
La técnica utilizada para obtener el modelo del convertidor se basa en espacio de estados, y en definir 2 condiciones de operación del interruptor activo Q: ON ($\mu=1$) y OFF ($\mu=0$). Enseguida, se toman 2 estados en el sistema: corriente en el inductor i_L y el voltaje de salida v_o (el cual también representa el voltaje en el capacitor). Los circuitos equivalentes para ambas condiciones de operación se muestran en la Figura N° 5.7.

Las ecuaciones que corresponden al convertidor DC/DC Buck, vienen dadas por:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L} + \frac{V_s}{L} \mu \quad (5.15)$$

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (5.16)$$

Figura N° 5.7
Modos de operación del convertidor DC/DC Buck
(Izq. On, Der. Off)



Fuente: Campos D. [4]

La variable de control viene representada por $\mu=0$ o $\mu=1$ determinando el estado del interruptor Q.

El modelo promedio de las ecuaciones (5.15) y (5.16) incluyendo variaciones en el voltaje de alimentación, está dado por:

$$x_1 = -\frac{x_2}{L} + \frac{V_s}{L}u + \frac{\hat{v}_s}{L}u \quad (5.17)$$

$$x_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (5.18)$$

Por otro lado, considerando la aproximación lineal de (5.17) y (5.18) alrededor de la condición nominal de operación (V_s, V_o, U, R) , se obtiene el modelo lineal en espacio de estados:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_s}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{u} + \begin{pmatrix} \frac{U}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{v}_s \quad (5.19)$$

$$y = (0 \quad 1) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

Aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones (5.19) y (5.20), y aplicando el teorema de superposición, se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{u}(s)} = \frac{V_0}{U} \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (5.21)$$

$$G_2(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{v}_s(s)} = U \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (5.22)$$

5.2.2 Diseño del Control PID del convertidor DC/DC Buck

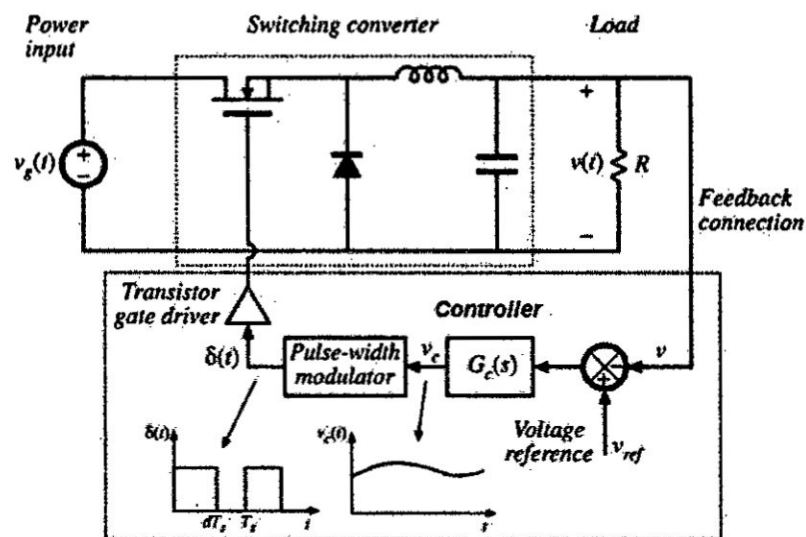
El esquema del sistema de control genérico para el convertidor Buck, se muestra en la Figura N° 5.8, en el que encuentra el convertidor Buck (planta) y el sistema de control realimentado, conformado por el bloque de diferencia entre el setpoint y la señal sensada, el controlador propiamente dicho, el PWM, el driver de gatillado o disparo para el mosfet [7].

El esquema del convertidor DC-DC Buck específico se muestra en la Figura N° 5.9. Como se puede observar, consta de dos Buck, uno mayor compuesto por tres MOSFET en configuración serie-paralelo, un sensor de corriente solar, un sensor de voltaje de salida, un MOSFET de protección de carga y el ARDUINO NANO v3.0 [13]. El segundo Buck está compuesto por un Buck LM2596, que recibe una tensión de entrada de 12 V y produce a su salida una tensión de 5V para alimentar al ARDUINO

NANO v3.0. En la Figura N° 5.10 se muestra al Arduino nano v3.0, y en la Figura N° 5.11 se presenta al pequeño convertidor DC/DC Buck LM2596.

Figura N° 5.8

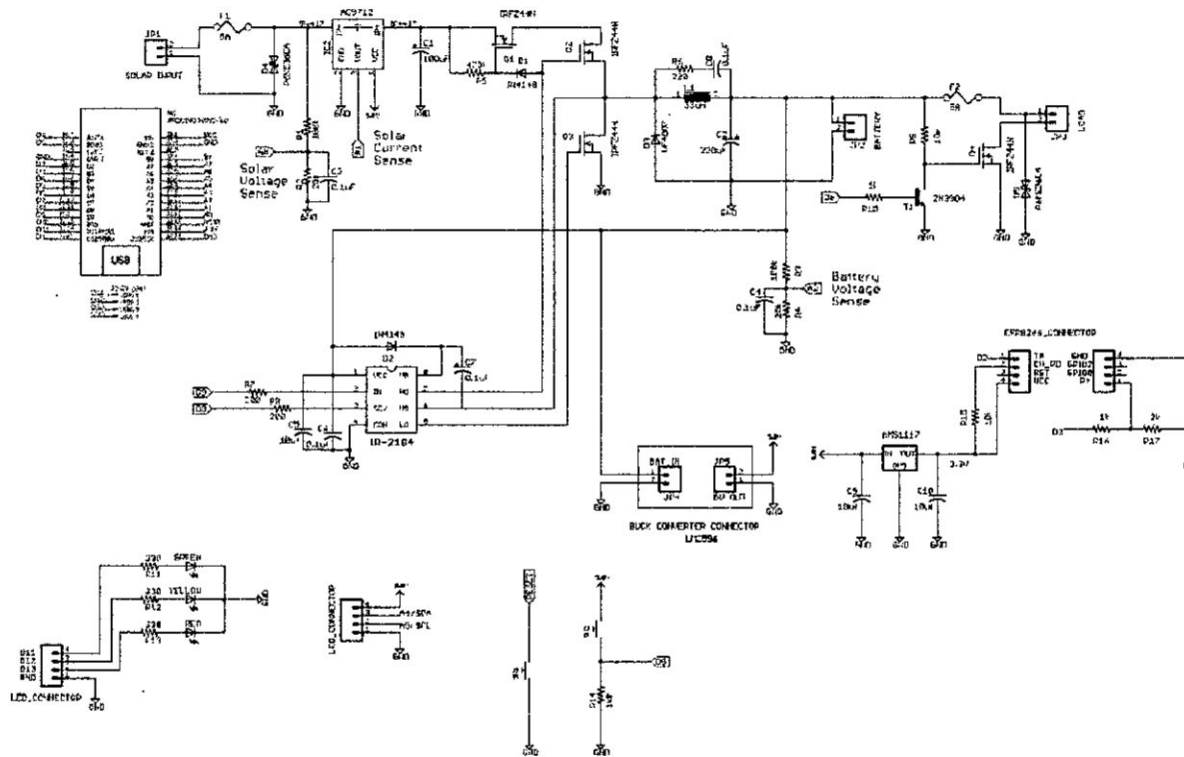
Esquema en lazo cerrado del convertidor Buck



Fuente: Córdova S., Ospina S. [5]

Handwritten signature

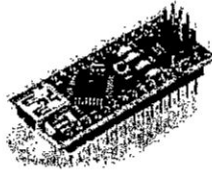
Figura N° 5.9
Diagrama esquemático del convertidor DC-DC Buck



Fuente: Benites N. [3]

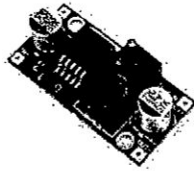
ds

Figura N° 5.10
Arduino Nano V3.0



Fuente: Arduino

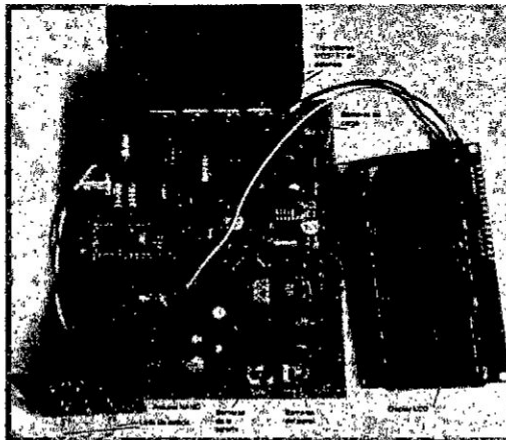
Figura N° 5.11
Módulo LM2596 (Convertidor Buck DC)



Fuente: Alibaba.com

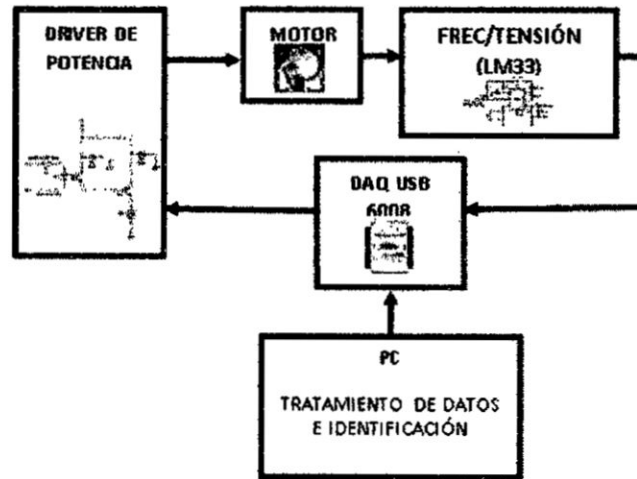
La implementación del convertidor DC/DC Buck se puede apreciar en la Figura N° 5.12.

Figura N° 5.12
Convertidor DC/DC Buck



Fuente: Benites N. [3]

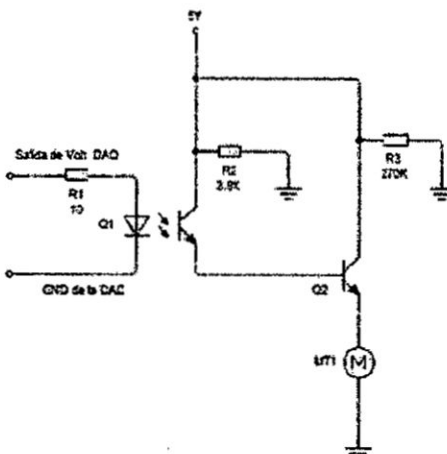
Figura N° 5.14
Componentes del sistema de adquisición,
tratamiento de datos e identificación



Fuente: Autoría propia

El circuito sensor está conformado por el CI LM331 (convertidor de frecuencia en voltaje), que es el que captura el movimiento rotacional del eje del motor, mediante la información de frecuencia que envía el codificador óptico (insertado en el motor DC).

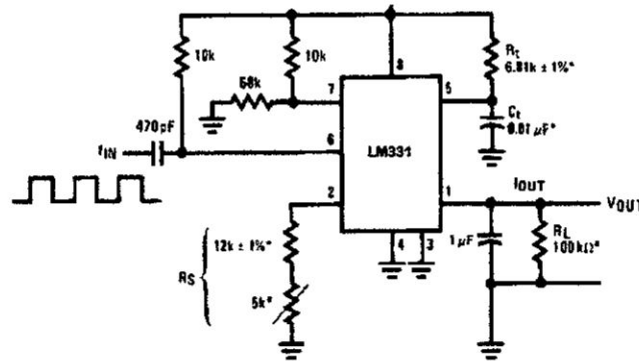
Figura N° 5.15
Circuito driver de potencia



Fuente: Autoría propia

La salida del convertidor LM 331 produce variaciones de voltaje que se conectan a la entrada analógica del DAQ USB 6008 (ver Figura N° 5.16).

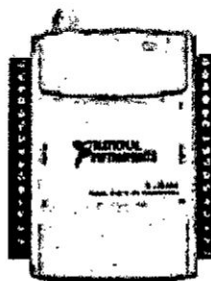
Figura N° 5.16
Circuito sensor y convertidor F/V



Fuente: Fairchild Semiconductor

La tarjeta de adquisición de datos es una NIDAQ USB 6008 de 12 bits de resolución, que se muestra en la Figura 5.17.

Figura N° 5.17
Aspecto físico de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008

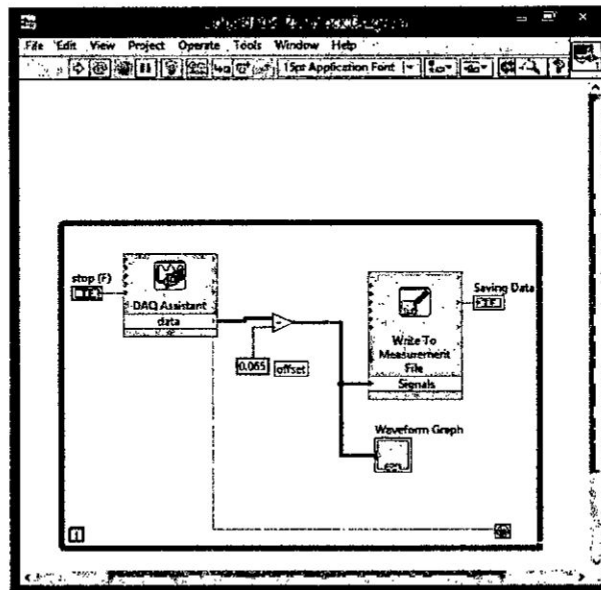


Fuente: Autoría propia

Los datos adquiridos luego del proceso de adquisición se guardaron en un archivo de datos en Excel, de denominación `data_motor.xlsx`, y el programa en LabVIEW tiene el nombre `adquidatos_2.lvm`. El programa en Matlab con el que se llama al

archivo de datos para el proceso de identificación es **identificación_gm.m**. El programa en LabVIEW se muestra en la Figura N° 5.18.

Figura N° 5.18
Programa en LabVIEW para la adquisición e
identificación del modelo del motor DC



Fuente: Autoría propia

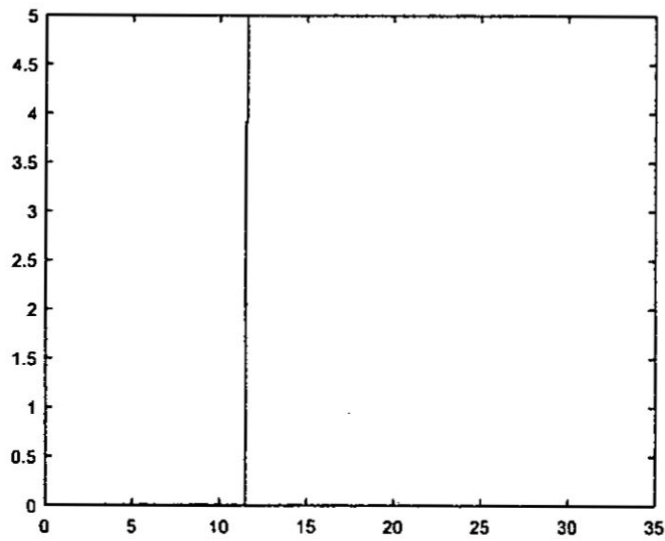
El programa de identificación denominado **identificación_gm.m** es el siguiente:

```
% IDENTIFICACION DEL MODELO DEL MOTOR DC GLOBE MOTORS
% IDENTIFICACIÓN NO PARAMÉTRICA Y PARAMÉTRICA
clc; close all; clear all
data=xlsread('data_motor.xlsx','Hoja1');
k=1:6459; % PARA PLOTEAR TODA LA DATA
T=0.005;
t=k*T;
y=data(:,2);
u=data(:,1);
plot(t,y,'b')
%hold on
%plot(t,u,'r')
ident
```

Def.

Al ejecutar el programa se obtiene la respuesta gráfica de la Figura N° 5.19 que viene a ser la gráfica de velocidad vs el tiempo.

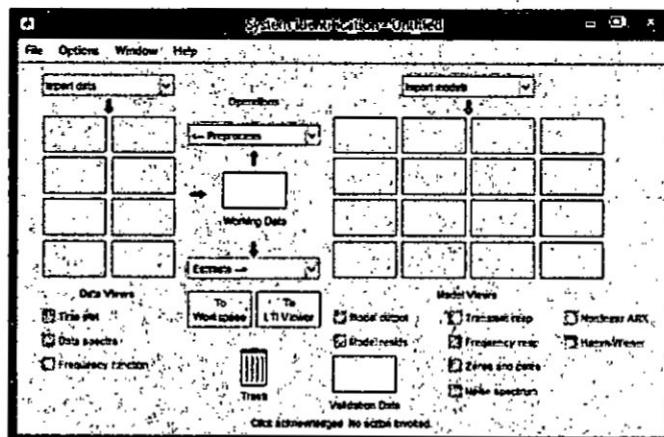
Figura N° 5.19
Gráfica de velocidad vs tiempo



Fuente: Autoría propia

Y a continuación llama al *ident* de Matlab, herramienta poderosa para el proceso de identificación. En consecuencia, aparecerá el pantallazo de la Figura N° 5.20.

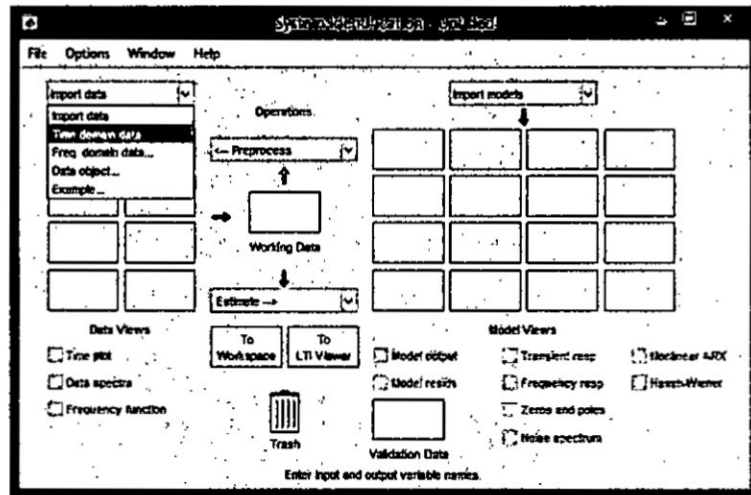
Figura N° 5.20
Ventana del Toolbox de identificación de Matlab



Fuente: Autoría propia

En la ventana superior izquierda se selecciona la opción Time domain data (Ver Figura N° 5.21).

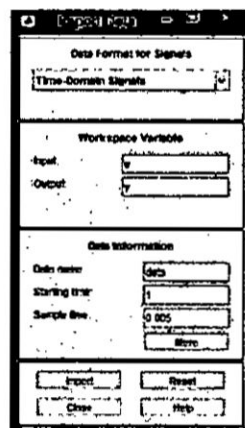
Figura N° 5.21
Selección de la opción Time domain data



Fuente: Autoría propia

Inmediatamente aparece otra ventana de configuración, denominada Import Data, en la cual se ingresan las variables de entrada y de salida, el nombre del archivo de datos y el período de muestreo entre otros, según se puede apreciar en la Figura N° 5.22.

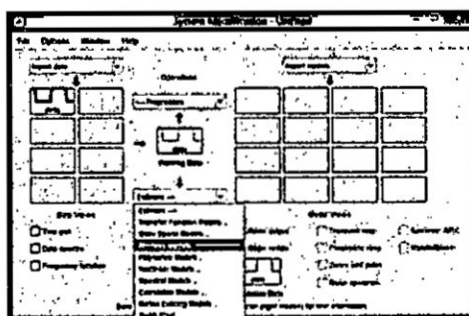
Figura N° 5.22
Ventana de configuración e importación de los datos



Fuente: Autoría propia

Luego se hace click en **Import** e inmediatamente aparece la ventana del sistema de identificación, apareciendo en el extremo superior izquierdo una ventanita en la que aparece cargada la data (figura de líneas azules), y luego se selecciona la opción **Process Model...**, tal como se muestra en la Figura N° 5.23.

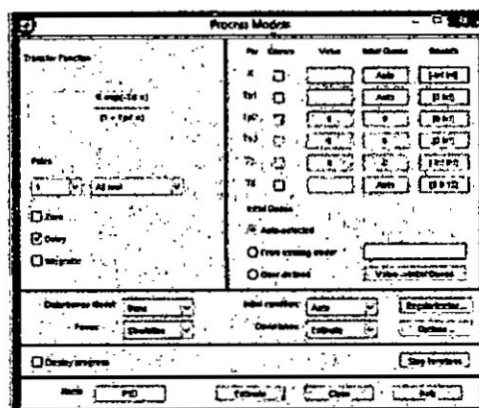
Figura N° 5.23
Selección de la opción Process Model



Fuente: Autoría propia

Enseguida aparece la ventana correspondiente, tal como se puede apreciar en la Figura 5.24.

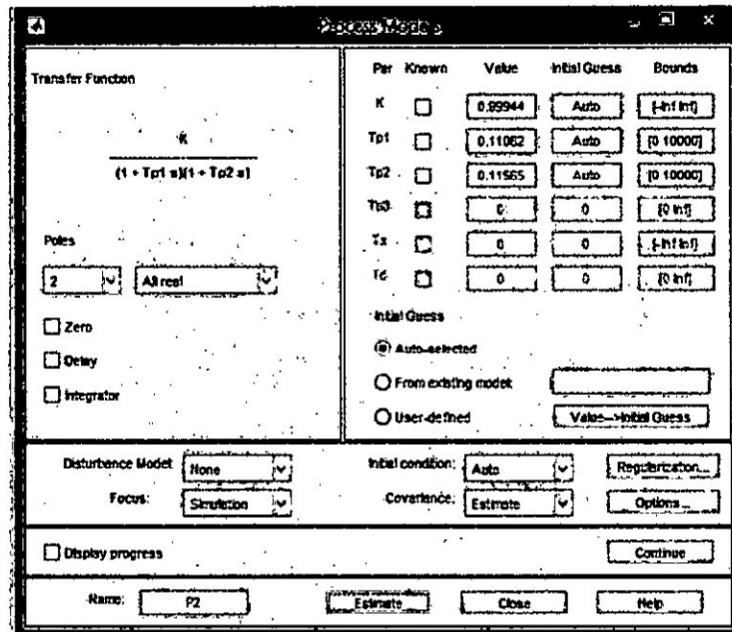
Figura N° 5.24
Ventana de configuración de polos y ceros, así como la selección del retardo, entre otros.



Fuente: Autoría propia

Se seleccionan polos y ceros y se hace click en **Estimate**, produciéndose la generación de la ganancia y los tiempos de respuesta del modelo del motor DC, como se muestra en la Figura N° 5.25.

Figura N° 5.25
Resultados de la ejecución, en el que se aprecian los parámetros del modelo del motor DC.



Fuente: Autoría propia

La función de transferencia del motor DC viene a ser:

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{(s+9.04)(s+8.647)}$$

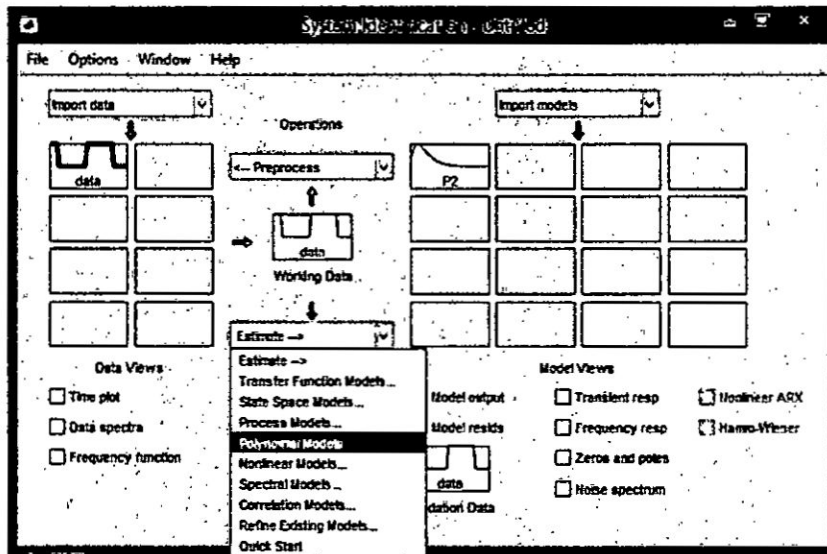
$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{s^2 + 17.687s + 78.1689} \quad (5.23)$$

5.3.2 Identificación Paramétrica del motor DC con encoder óptico

En esta sección se aborda la identificación paramétrica del motor DC en el dominio discreto, considerando varias estructuras paramétricas, como el ARX, ARMAX entre otros; para luego escoger la mejor estructura y orden que representa al motor DC.

En la Figura N° 5.26 se muestra la ventana **System Identification**, y en ella se selecciona la opción **Polynomial Models**, correspondiente al modelo paramétrico.

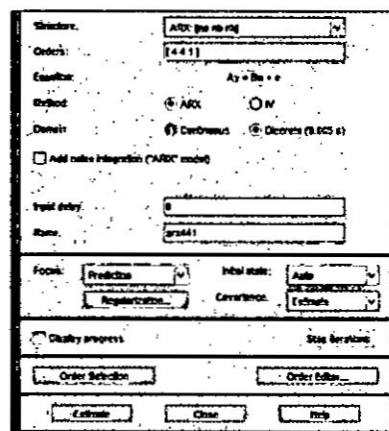
Figura N° 5.26
Selección del modelo polinomial (paramétrico).



Fuente: Autoría propia

Lo que genera la aparición de la ventana **Polynomial Models**, en el que se selecciona la estructura y el orden del sistema paramétrico (arx, armax, etc.), tal como se puede apreciar en la Figura N° 5.27.

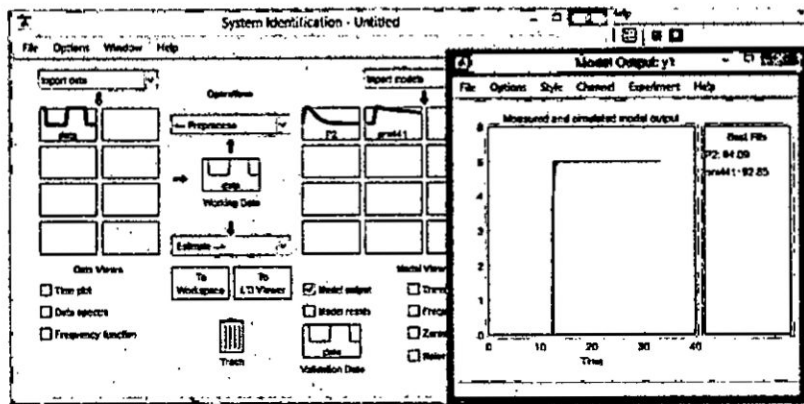
Figura N° 5.27
Configuración de la estructura ARX



Fuente: Autoría propia

Se da click en **Estimate**, apareciendo la respuesta gráfica arx (color verde) superpuesta a la respuesta de función de transferencia (P2). Se puede apreciar que la estructura ARX presenta menor exactitud que la anterior (ver Figura N° 5.28).

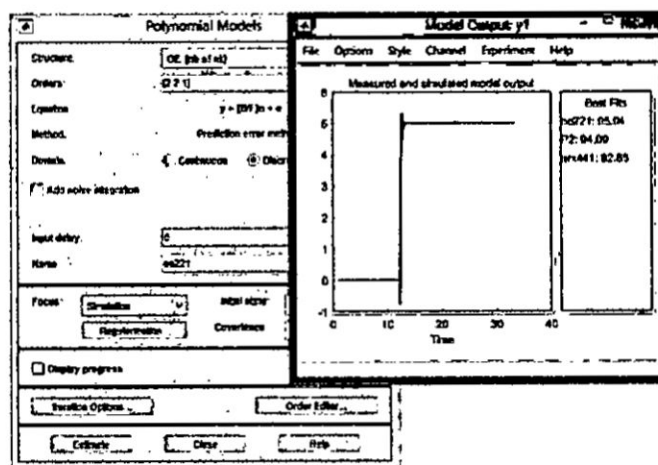
Figura N° 5.28
Respuesta de la estructura ARX (color verde)



Fuente: Autoría propia

Enseguida seleccionamos la estructura OE, la cual presenta una exactitud mayor (95.94 %), tal como se puede apreciar en la Figura N° 5.29.

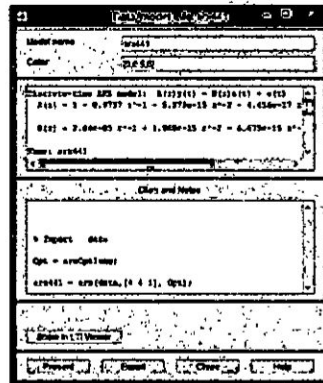
Figura N° 5.29
Respuesta de la estructura OE



Fuente: Autoría propia

La estructura polinomial del ARX se puede visualizar en la parte superior de la Figura N° 5.30.

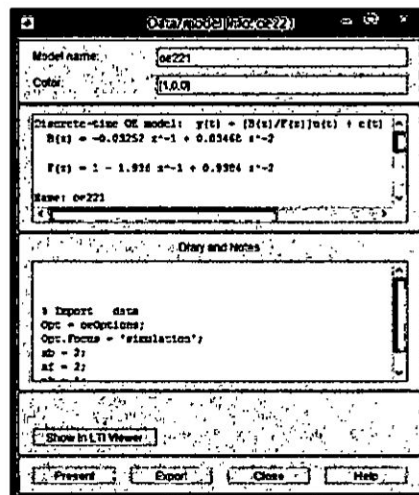
Figura N° 5.30
Estructura polinomial en tiempo discreto del ARX



Fuente: Autoría propia

Idénticamente, la estructura polinomial OE tendrá la respuesta mostrada en la Figura N° 5.31.

Figura N° 5.31
Estructura polinomial en tiempo discreto del OE



Fuente: Autoría propia

Por lo tanto, el modelo en tiempo discreto viene dada por la ecuación en diferencias dada por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t) + e(t) \quad (5.24)$$

Siendo:

$$B(z) = -0.03252 z^{-1} + 0.03468 z^{-2}$$

$$F(z) = 1 - 1.936 z^{-1} + 0.9384 z^{-2}$$

Siendo el orden de los polinomios:

$$n_b = 2; \quad n_f = 2; \quad n_k = 1$$

5.4 Diseño del Sistema de Control PID de velocidad del motor DC

5.4.1 Introducción

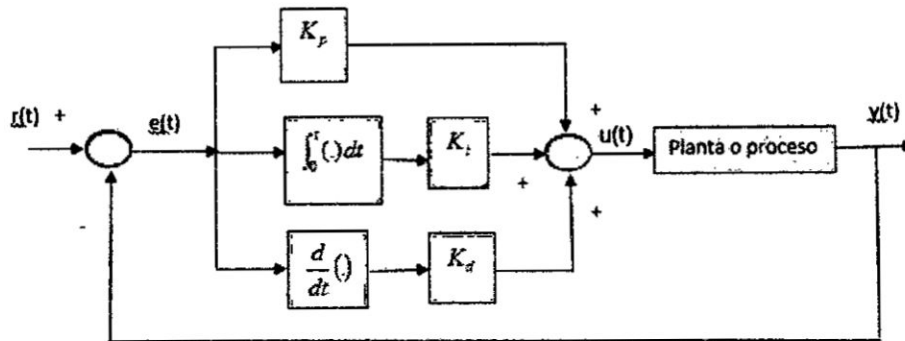
El control Proporcional Integral Derivativo (PID), es uno de los controladores clásicos más populares utilizados en el campo académico y en la industria. Inicialmente fue diseñado para atender el diseño de sistemas sencillos, particularmente univariados, denominados sistemas de simple entrada y simple salida (Single Input, Single Output: SISO), que no contemplaba variaciones de las condiciones de funcionamiento del proceso o planta; sin embargo, el avance tecnológico y la demanda por una mayor producción, de mejor calidad del producto, producción en menor tiempo, etc., hizo que se diseñaran máquinas y herramientas que permitieran el control de sistemas más complejos, multivariados, es decir sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple Input, Multiple Output: MIMO), y con dinámicas acopladas. En estas condiciones, las potencialidades del Control PID convencional no podían resolver el control de sistemas MIMO; por lo que se resolvió considerando condiciones de desacoplamiento del modelo del proceso, que permitieron el diseño de controladores PID MIMO de estructura desacoplada. Posteriormente aparecieron mejoras, tales como el Control PID Autosintonizado y Control PID Adaptivo, entre otros.

Jw.

5.4.2 Diseño del Controlador PID

En este trabajo, trataremos del diseño del Control PID clásico en tiempo continuo, cuyo diagrama de bloques puede apreciarse en la Figura 5.32.

Figura N° 5.32
Diagrama de bloques del Control PID acoplada a la planta



Fuente: Autoría propia

El algoritmo de control PID [12] se obtiene del diagrama de bloques de la Figura N° 5.32

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.25)$$

Siendo:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}; \quad K_d = K_p T_d$$

La función de transferencia del controlador PID en tiempo continuo viene dada por:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p (T_d s^2 + s + 1/T_i)}{s} \quad (5.26)$$

Por consiguiente, la función de transferencia directa viene expresada por:

$$G(s) = G_p(s) G_c(s) = \frac{78.123 K_p (T_d s^2 + s + 1/T_i)}{s(s^2 + 17.687s + 78.1689)} \quad (5.27)$$

Por lo que, la función de transferencia de lazo cerrado es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{78.123K_p(T_d s^2 + s + 1/T_i)}{s^3 + (17.687 + 78.123K_p T_d)s^2 + (78.1689 + 78.123K_p)s + 78.123K_p/T_i} \quad (5.28)$$

En tal sentido, la ecuación característica de lazo cerrado es:

$$s^3 + (17.687 + 78.123K_p T_d)s^2 + (78.1689 + 78.123K_p)s + 78.123K_p/T_i = 0 \quad (5.29)$$

Para determinar los parámetros del Controlador PID, consideraremos las siguientes especificaciones de funcionamiento de lazo cerrado:

$$t_s = 1 \text{ Seg}; \quad \zeta = 0.8$$

Por lo que considerando el criterio de error del 2%, obtendremos:

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} = 1 \quad \Rightarrow \quad \zeta \omega_n = 4; \quad \omega_n = 5 \text{ rad/seg}$$

Para que la respuesta del sistema en lazo cerrado se aproxime a la respuesta de un sistema de segundo orden, elegimos el tercer polo ubicado a 5 veces la parte real de los polos dominantes, por lo que $p_3 = 5(\zeta \omega_n) = 20$. En consecuencia la ecuación característica deseada de lazo cerrado, viene representada por:

$$\begin{aligned} (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + p_3) &= 0 \\ (s^2 + 8s + 25)(s + 20) &= 0 \\ s^3 + 28s^2 + 185s + 500 &= 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Igualando las ecuaciones (5.29) y (5.30), obtenemos los parámetros del Controlador PID, así:

$$78.1689 + 78.123K_p = 185 \quad \Rightarrow \quad K_p = 1.3674$$

$$17.6875 + 78.123K_p T_d = 185 \quad \Rightarrow \quad T_d = 0.0965 \text{ Seg.}$$

$$78.123 \frac{K_p}{T_i} = 500 \quad \Rightarrow \quad T_i = 0.2136 \text{ Seg.}$$

Los parámetros del Controlador PID obtenidos en esta sección, nos servirá para efectuar la simulación de la respuesta del sistema en lazo cerrado, que se verá en el Capítulo VI.

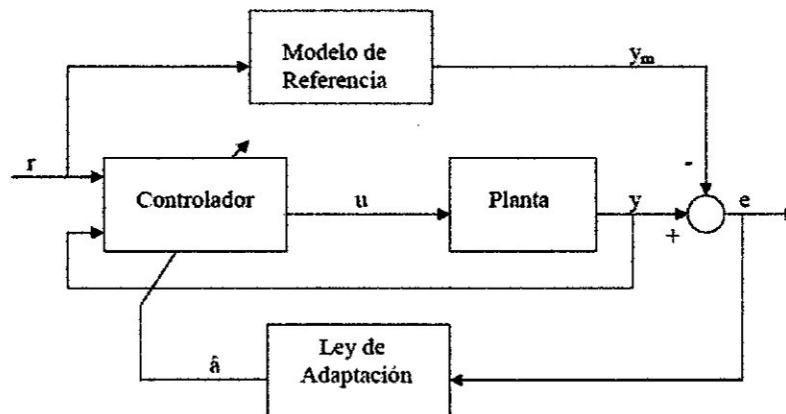
5.5 Diseño del Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)

5.5.1 Introducción

En este tipo de control adaptivo se parte de un comportamiento ideal del sistema, definido por un modelo de referencia. La diferencia instantánea entre el comportamiento real " y " y el modelo deseado " y_m " se utiliza para calcular los parámetros del controlador utilizado [2].

La figura 5.33 representa el funcionamiento de un sistema de control adaptivo con modelo de referencia.

Figura N° 5.33
Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia



Fuente: Astrom K. [2]

Para el diseño del Controlador Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC), se deben considerar lo siguiente:

- ✓ Se asume que la planta tiene una estructura conocida, aunque los parámetros son desconocidos. Para plantas lineales, se asume que el número de polos y ceros son conocidos; pero la localización de esos polos y ceros no lo son. Para plantas no lineales, esto implica que la estructura dinámica de la ecuación es conocida, pero que varios parámetros no lo son.
- ✓ El modelo de referencia es usado para especificar la respuesta ideal del sistema de control Adaptivo a una orden externa.

- ✓ El controlador es usualmente parametrizado por un número de parámetros ajustables (implica que se pueden obtener una familia de controladores por asignación de diferentes valores de parámetros ajustables). El controlador puede tener capacidad de seguimiento perfecto en orden a toda posibilidad de seguimiento convergente.

5.5.2 Determinación del Modelo de Referencia

El Modelo de Referencia como función de transferencia viene dada por:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.31)$$

Para determinar los parámetros del Modelo de Referencia dada por la ecuación (5.31), necesitamos especificar el comportamiento del sistema de control en lazo cerrado, para lo cual consideraremos:

$$t_s = 1 \text{ Seg}; \quad MP = 0.01$$

Determinemos el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural.

$$MP = e^{-\zeta\pi / \sqrt{1-\zeta^2}} = 0.01 \quad \Rightarrow \quad \text{operando:} \quad \zeta = 0.8261$$

$$t_s = 1 = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad \Rightarrow \quad \omega_n = \frac{4}{0.8261} = 4.8421$$

En consecuencia, el Modelo de Referencia viene expresada por:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{23.45}{s^2 + 8s + 23.45} \quad (5.32)$$

5.5.3 Determinación de la Ley de Control

De la ecuación (5.23) se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$y_p(t) + 17.687y_p(t) + 78.1689y_p(t) = 78.123u(t) \quad (5.33)$$

Idénticamente, de la ecuación (5.32), se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$y_m(t) + 8y_m(t) + 23.45y_m(t) = 23.45r(t) \quad (5.34)$$

Como debemos obtener error estacionario nulo, es decir:

$$e = y_p - y_m = 0 \Rightarrow y_p = y_m$$

Entonces, igualando (5.33) con (5.34):

$$-17.687y_p(t) - 78.1689y_p(t) + 78.123u(t) = -8y_m(t) - 23.45y_m(t) + 23.45r(t)$$

Despejando la señal de control "u(t)", obtenemos:

$$u(t) = 0.2264y_p(t) + y_p(t) - 0.1024y_m(t) - 0.3002y_m(t) + 0.3002r(t)$$

Como $y_p = y_m$; $y_p = y_m$, entonces la ley de control adaptiva viene dada por:

$$u(t) = 0.124y_p(t) + 0.7y_p(t) + 0.3002r(t) \quad (5.35)$$

Que es de la forma:

$$u(t) = q_0 y_p(t) + q_1 y_p(t) + f r(t) \quad (5.36)$$

Por lo que: $q_0 = 0.124$; $q_1 = 0.7$; $f = 0.3002$

5.6 Implementación del hardware utilizado para el control de velocidad

A continuación se lista el hardware utilizado:

1. Tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6008 (ver Figura N° 5.34)

Figura N° 5.34

Tarjeta DAQ USB 6008

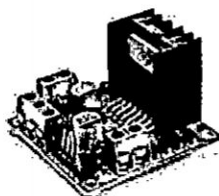


Fuente: Autoría propia

2. Módulo L298N (Driver de potencia)

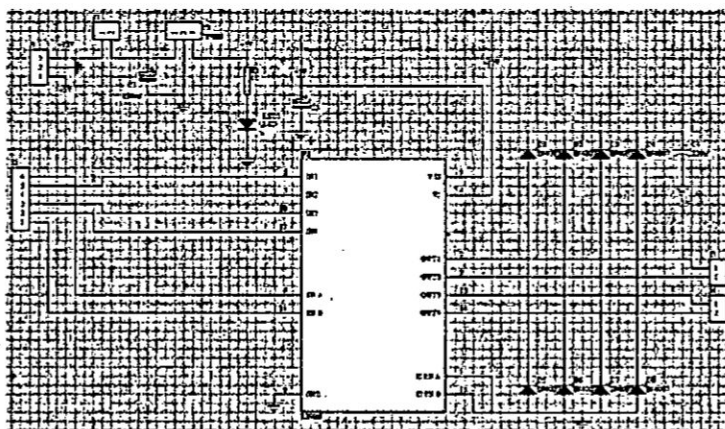
En la Figura N° 5.35 se puede apreciar la tarjeta del módulo de potencia L298N y en la Figura N° 5.36 se visualiza el esquema del mismo.

Figura N° 5.35
Módulo L298 (driver de potencia)



Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.36
Esquema del módulo L298 (Driver de potencia)



Fuente: Autoría propia

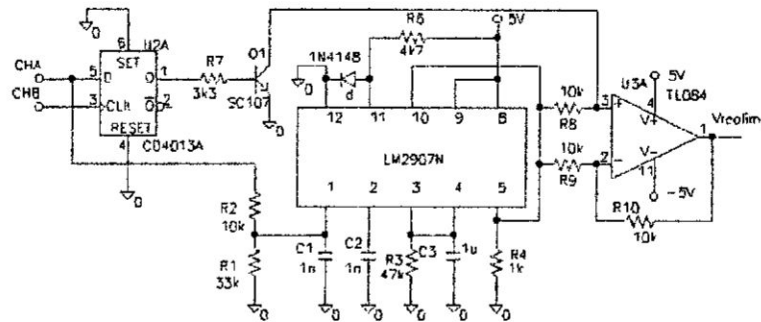


3. C.I. Conversor de frecuencia a voltaje (Circuito sensor de velocidad)

El circuito de la Figura N° 5.37 está basado en el CI LM2907N. A partir de uno de los canales del encoder (por ejemplo el CHA) se obtiene la velocidad absoluta a la que gira el motor, por medio de un circuito

adicional (decodificador de cuadratura: CD4013A). La salida del circuito sensor se obtiene por medio del TL084.

Figura N° 5.37
Circuito sensor de velocidad



Fuente: Autoría propia

4. Conversor voltaje/PWM SG63524

En la Figura N° 5.38 se puede apreciar el circuito integrado SG63524, que viene a ser un generador PWM, bastante útil para convertir la tensión proveniente de la tarjeta USB 6008 (señal de control) en señal modulada en ancho de pulso, y así no ser afectada por el ruido. Las salidas del PWM se conectan al driver de potencia L298.

Figura N° 5.38
Chip SG63525 (Generador PWM)



Fuente: Microsemi

5. Motor DC con encoder óptico acoplado su eje.

En la Figura N° 5.39 se observa el motor DC con encoder óptico, de la marca Globe Motors.

Figura N° 5.39
Motor DC Globe Motors con encoder óptico acoplado



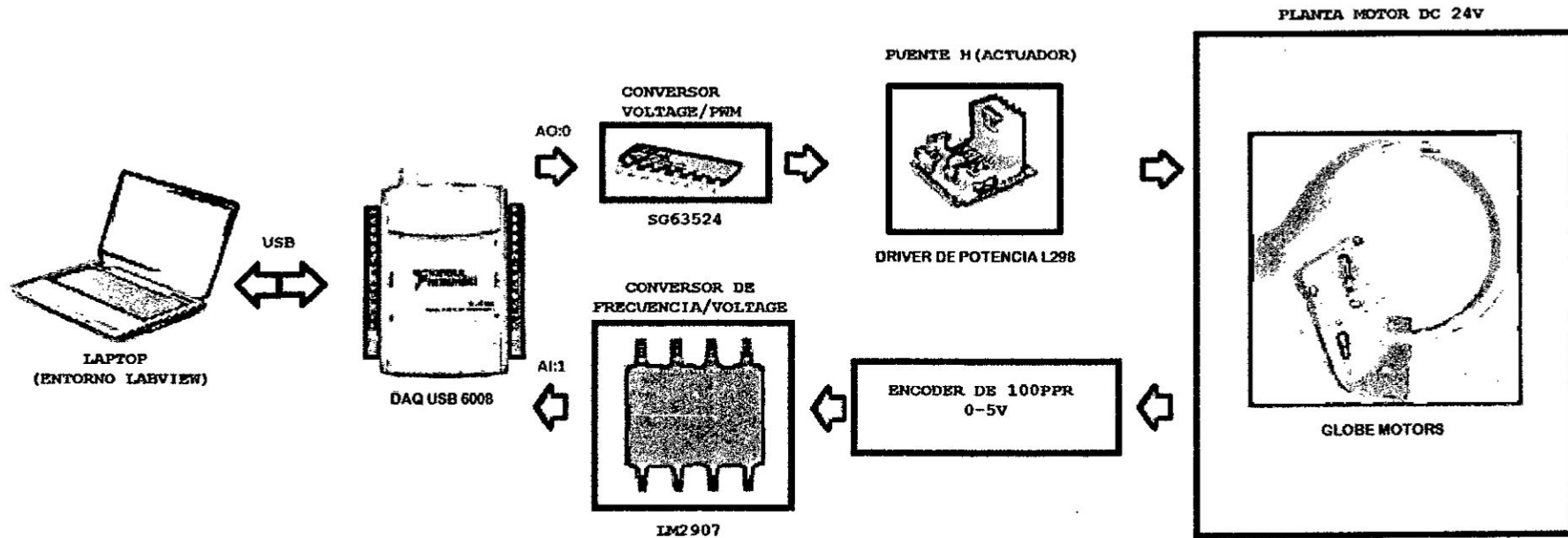
Fuente: Autoría propia

En la Figura N° 5.40 se puede apreciar el diagrama de bloques de la implementación del circuito de control de velocidad del motor DC, en la cual se pueden observar los componentes indicados líneas arriba.

Aut

Figura N° 5.40

Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware para el control de velocidad del motor DC.



Fuente: Autoría propia

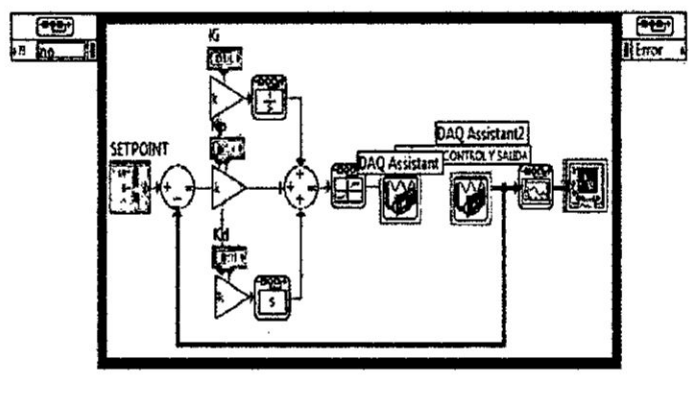
Aut

5.7 Implementación del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) a nivel de software

La implementación del programa en tiempo real, se ha realizado en código gráfico, utilizando para ello LABVIEW [9]. La programación gráfica se muestra en la Figura 5.41, y el panel frontal o panel del usuario se muestra en la Figura N° 5.42.

Figura N° 5.41

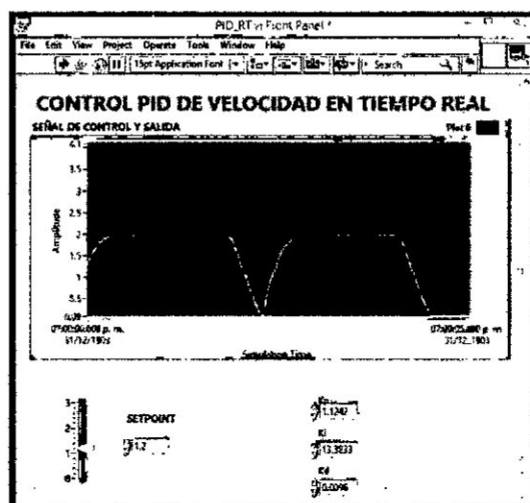
Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware del Control PID de velocidad del motor DC



Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.42

Gráfica del Control de velocidad PID del motor DC



Fuente: Autoría propia

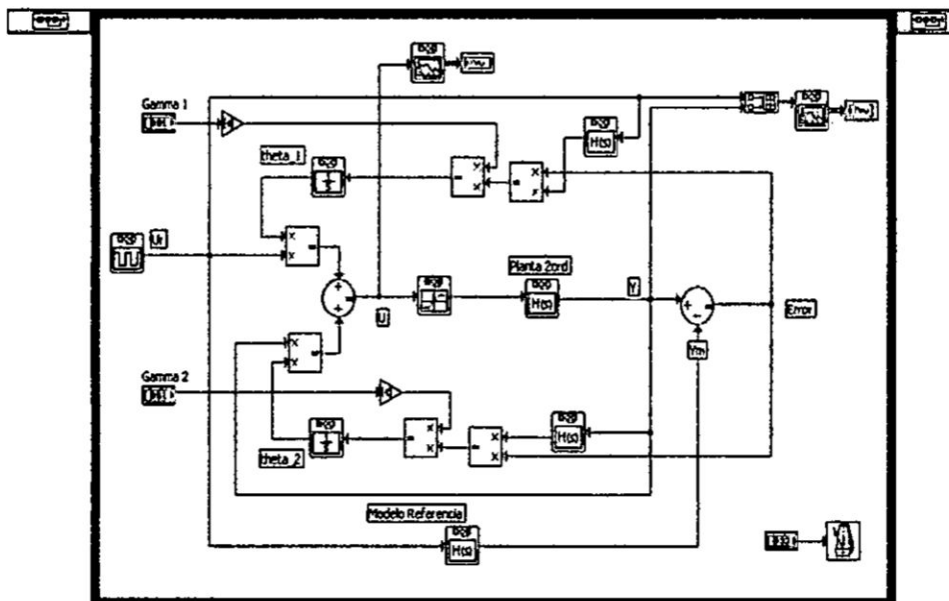
Handwritten signature

En el Capítulo VI se presentan los resultados del Control PID en tiempo real, de la señal controlada vs señal de referencia, usando LabVIEW.

5.8 Implementación del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de software

La implementación a nivel de software del MRAC (Panel Frontal), siguiendo las consideraciones de diseño establecidas en la sección 5.5, se muestra en la Figura N° 5.43 (Block Diagram), y el resultado gráfico se muestra en la sección 6.7.

Figura N° 5.43
Diagrama de bloques en LabVIEW



Fuente: Autoría propia

Handwritten signature

VI RESULTADOS

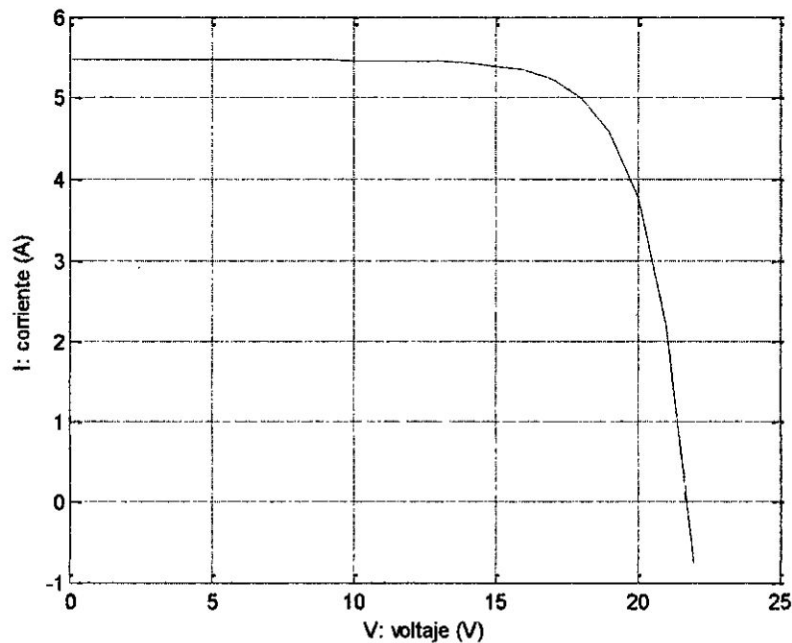
6.1 Resultados del modelado del panel solar

Reemplazando valores correspondientes al panel solar SFM 90W, en la ecuación 5.13 (capítulo V, subsección 5.1), se obtiene:

$$b = \frac{\frac{18.1}{21.8} - 1}{\ln\left[1 - \frac{4.98}{5.47}\right]} = 0.0703 \quad (6.1)$$

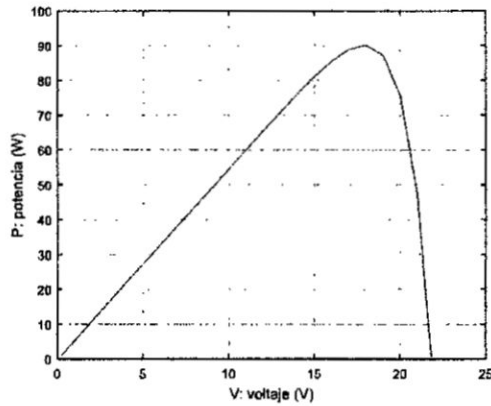
Si reemplazamos este valor en las ecuaciones 5.6 y 5.7, se obtienen las ecuaciones específicas de corriente y voltaje que permiten obtener las curvas V-I del panel solar, tal como se muestra en la Figura N° 6.1, y considerando la ecuación 5.8 se obtiene la Figura N° 6.2.

Figura N° 6.1
Respuesta V-I del panel fotovoltaico



Fuente: Autoría propia

Figura N° 6.2
Respuesta P-V del panel fotovoltaico

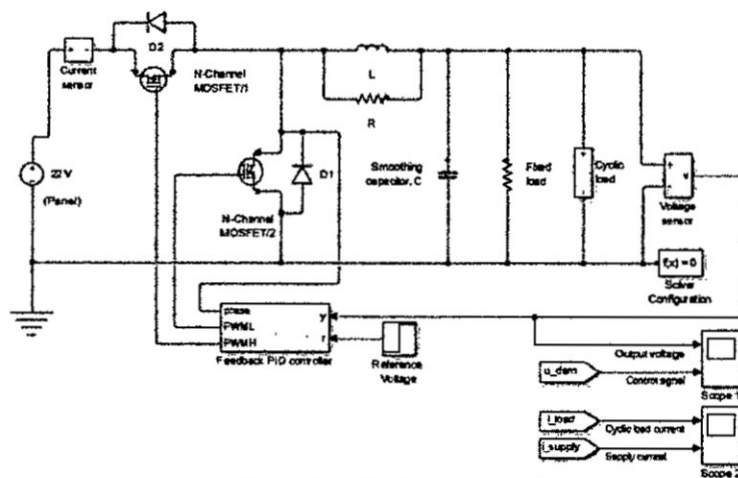


Fuente: Autoría propia

6.2 Resultados de la implementación del sistema de alimentación con Panel Solar

La alimentación del motor DC se realiza por medio del regulador de carga, compuesto por el convertidor Buck, por lo que, la implementación del control PID del convertidor Buck en la plataforma Simulink [11], [1], se puede observar en la Figura N° 6.3, considerando una tensión de entrada de 22 V y un voltaje de referencia que va de 5 V a 12 V. El resultado, es una salida adecuada, tal como se muestra en la Figura N° 6.4.

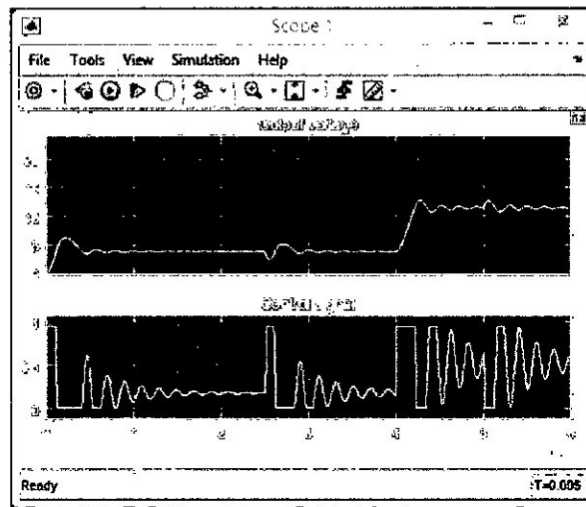
Figura N° 6.3
Esquema de Control PID del Convertidor Buck en Simulink



Fuente: Autoría propia

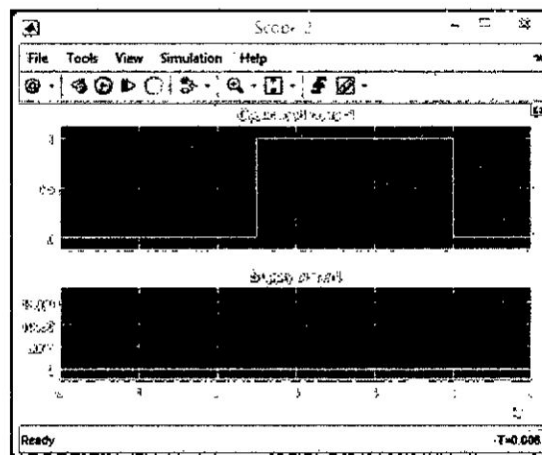
Asimismo en la Figura N° 6.5 se puede observar la corriente del ciclo de carga.

Figura N° 6.4
Voltaje de salida del convertidor Buck en
Simulink



Fuente: Autoría propia

Figura N° 6.5
Corriente del ciclo de carga del convertidor Buck en
Simulink

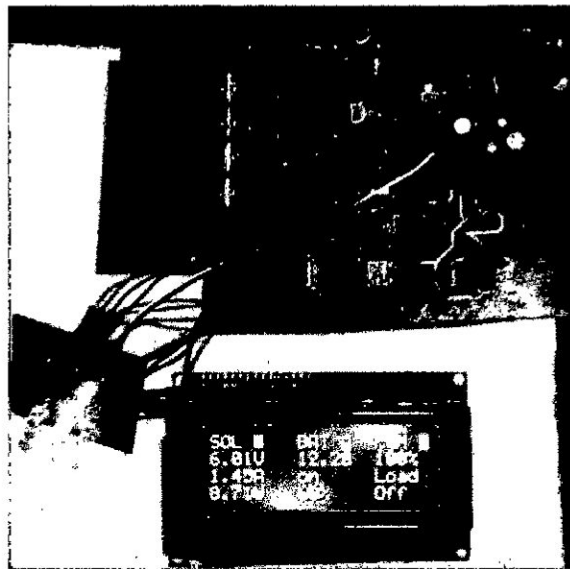


Fuente: Autoría propia

Handwritten signature

Asimismo, los resultados en tiempo real, usando una tarjeta reguladora de carga (convertidor Buck) y la plataforma ARDUINO, puede observarse en la Figura N° 6.6, en el que podemos observar la lectura del display LCD del controlador de carga (convertidor Buck).

Figura N° 6.6
Lectura del convertidor DC/DC Buck



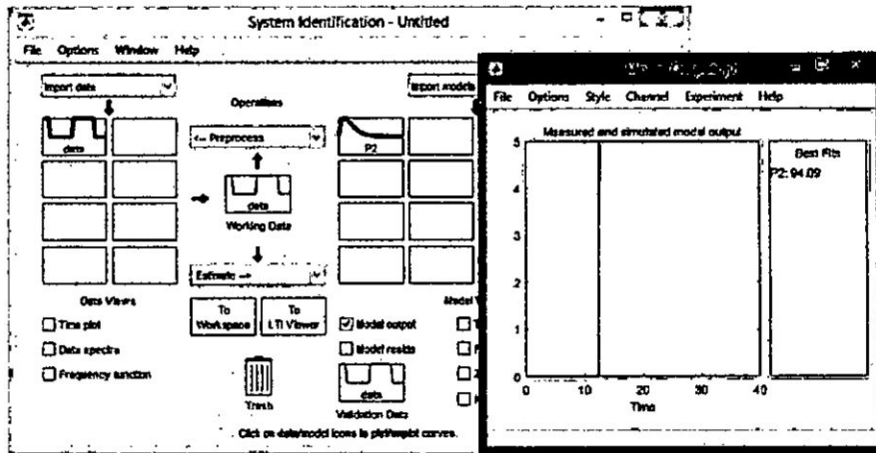
Fuente: Benites N. [3]

6.3 Resultados de la identificación del modelo del motor DC

Como se puede observar de la Figura 5.19 (capítulo V, sección 5.2), la ganancia es $K = 0.99944$, y los tiempos de respuesta son: $T_{p1} = 0.11062$ seg., $T_{p2} = 0.11565$ seg. Luego en la ventana de identificación de sistemas (System Identification) se hace click en Model Output, y se obtiene la respuesta gráfica mostrada en la Figura N° 6.7.

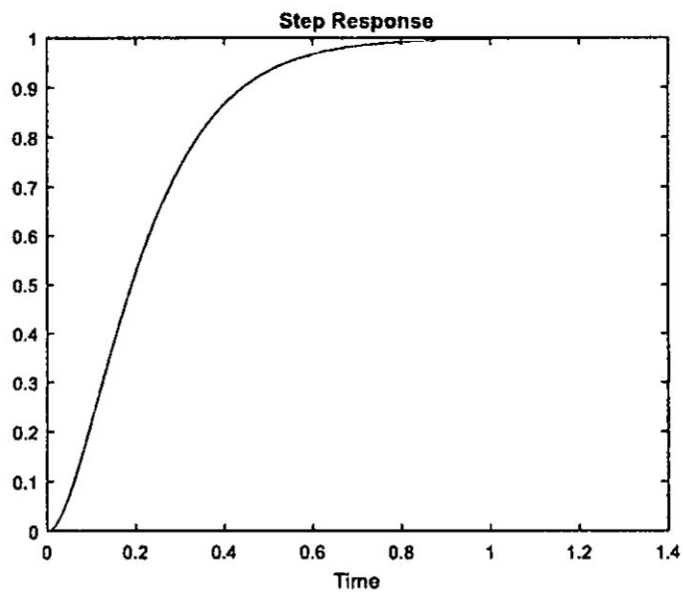
Se puede apreciar que el proceso de identificación arroja un 94.09 % de exactitud. Asimismo, en la Figura N° 6.8 se muestra la respuesta al escalón del modelo de función de transferencia obtenido.

Figura N° 6.7
Resultado gráfico del proceso de identificación.



Fuente: Autoría propia

Figura N° 6.8
Respuesta del modelo a una entrada escalón unitario.



Fuente: Autoría propia

Comparación con el modelo teórico y determinación de los parámetros del motor DC

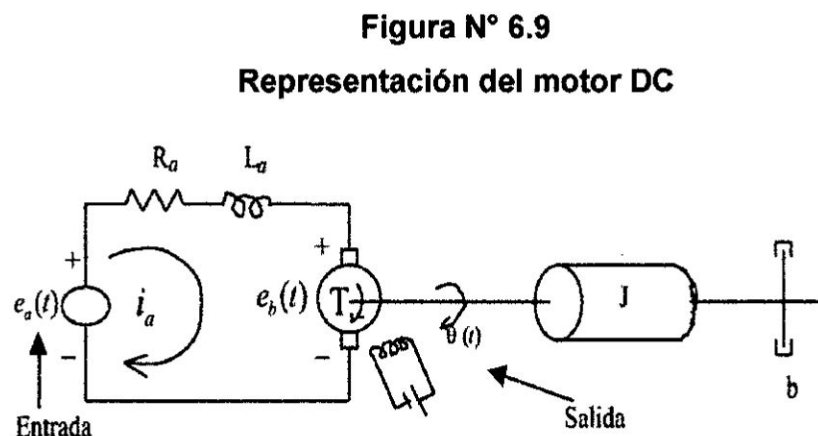
A continuación, se pasa al proceso de comparación del modelo de función de transferencia obtenido por identificación con el método teórico, para así obtener los parámetros específicos del motor DC.

Recordemos que el modelo de función de transferencia del motor DC por el proceso de identificación es:

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{(s + 9.04)(s + 8.647)}$$
$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{s^2 + 17.687s + 78.1689} \quad (6.2)$$

Ahora, obtengamos el modelo teórico del motor DC.

En la Figura 6.9 se observa la representación del motor DC, teniendo como entrada de excitación la tensión de armadura, y manteniendo constante la tensión y la corriente en el circuito de campo.



Fuente: Autoría propia

Las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del motor DC se pueden circunscribir a las siguientes partes:

1. Circuito Eléctrico

El circuito eléctrico del motor viene representada por la ecuación de Kirchoff, así:

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (6.3)$$

2. Conversión de energía Eléctrica en Mecánica

El torque T desarrollado por el motor es proporcional al producto de la corriente de armadura $i_a(t)$ y al flujo φ en el entrehierro, el que a su vez es proporcional a la corriente de campo, donde:

$$\begin{aligned} \varphi &= K_f i_f = cte. \\ \dot{T}(t) &= \varphi K_a i_a; \quad \text{por lo que:} \\ T(t) &= K_f i_f K_a i_a \\ T(t) &= K i_a \end{aligned} \quad (6.4)$$

Siendo:

K_f : Constante de campo

K_a : Constante de armadura

$K = K_f i_f K_a = cte.$

e_a : Tensión de armadura

e_f : Tensión de campo

i_a : Corriente de armadura

i_f : Corriente de campo

R_a : Resistencia de armadura

L_a : Inductancia de armadura

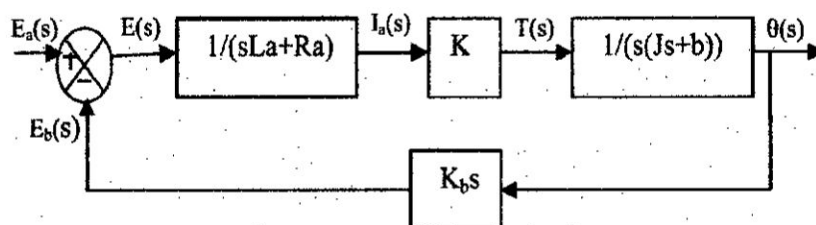
3. Circuito Mecánico

Aplicando la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional se obtiene:

$$T(t) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} \quad (6.5)$$

Figura N° 6.10

Diagrama de bloques representativo del modelo de función de transferencia del motor DC



Fuente: Autoría propia

La función de transferencia del motor DC considerando como salida la posición angular es:

$$G_p(s) = \frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{JL_a s^3 + (L_a b + R_a J)s^2 + (R_a b + K_b K)s} \quad (6.13)$$

Como nuestro modelo considera que la salida es la velocidad angular, entonces la función de transferencia es:

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K / JL_a}{s^2 + [(L_a b + R_a J) / JL_a]s + [(R_a b + K_b K) / JL_a]} \quad (6.14)$$

Igualando las ecuaciones 6.2 y 6.14, se obtiene:

$$\frac{K}{JL_a} = 78.123; \quad \frac{R_a b + K_b K}{JL_a} = 78.1689; \quad \frac{L_a b + R_a J}{JL_a} = 17.1689$$

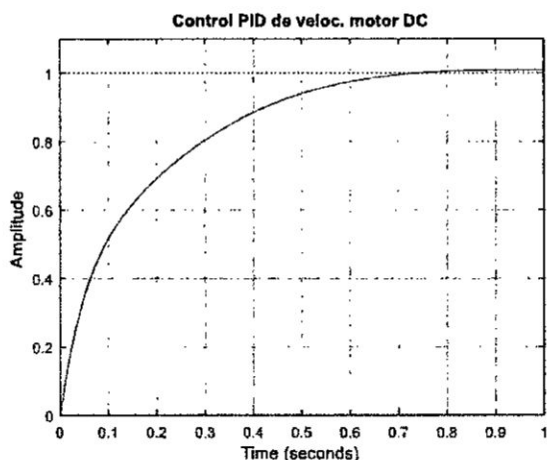
Considerando las mediciones de voltaje en los extremos del motor, el cálculo de la resistencia de armadura a plena carga, y despejando los parámetros, se encuentran que:

$$K \approx 1; \quad R_a = 1.67\Omega; \quad K_b = 0.02V / rad / s; \quad b = 0.9Nm / rad / s; \\ J = 1.2 \times 10^{-2} Nms^2$$

6.4 Resultados de la simulación del Control PID de velocidad del motor DC

La función de transferencia, del controlador PID viene dada por la ecuación (5.18). Reemplazando valores de los parámetros del Controlador PID obtenidos analíticamente, nos sirve para efectuar la simulación de la respuesta del sistema en lazo cerrado. Al ejecutar el programa *PIDmotor.m* se obtiene la respuesta gráfica mostrada en la Figura 6.11.

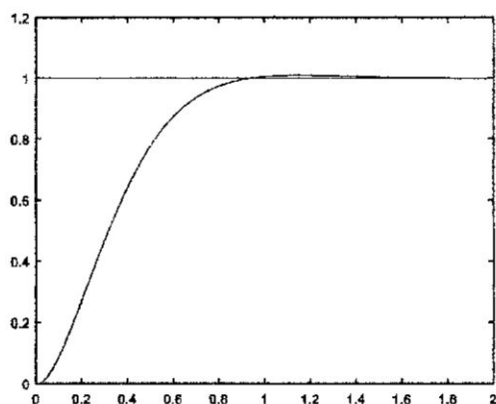
Figura N° 6.11
Respuesta del Sistema de Control PID frente
a una entrada escalón unitario



Fuente: Autoría propia

6.5 Resultados de la simulación del Control MRAC de velocidad del motor DC
Al ejecutar el programa *vel_mracs_motor.m*, obtenemos la respuesta gráfica del MRAC, tal como se puede apreciar en la Figura N° 6.12.

Figura N° 6.12
Respuesta del Sistema del MRAC frente a
una entrada escalón unitario



Fuente: Autoría propia

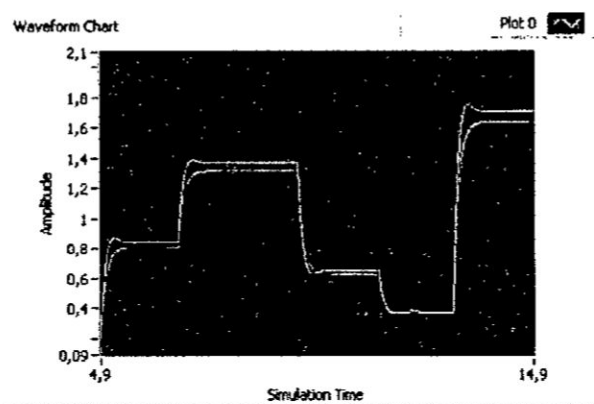
Aut

6.6 Resultados del Control PID de velocidad del motor DC en tiempo real

En la Figura N° 6.13 se presenta las gráficas comparativas de las señales de Referencia (Setpoint: rojo) y la velocidad controlada (salida: amarillo).

Figura N° 6.13

Salida controlada (velocidad del motor: amarillo)
vs setpoint (velocidad de referencia: rojo)



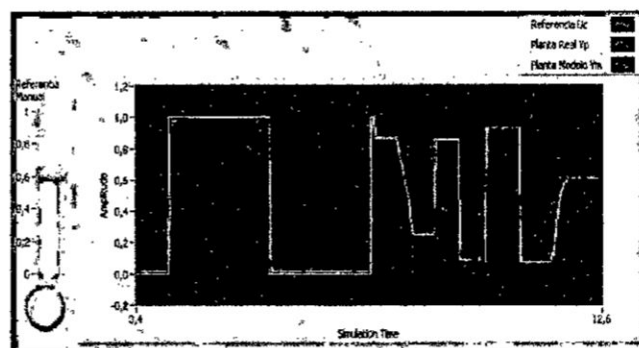
Fuente: Autoría propia

6.7 Resultados del MRAC de velocidad del motor DC en tiempo real

Los resultados del Control MRAC en tiempo real, se muestran en la Figura N° 6.14, y en él se puede visualizar dos gráficas superpuestas, la salida controlada y la referencia.

Figura N° 6.14

Salida controlada (velocidad del motor: rojo) vs
setpoint (velocidad de referencia: amarillo)



Fuente: Autoría propia

Los parámetros del MRAC obtenidos al obtener la ley de control, con los que conseguimos adaptación rápida y respuesta muy cercana a la buscada, son:

$$q_0 = 0.124; \quad q_1 = 0.7; \quad f = 0.3002$$



VII. DISCUSIÓN

7.1 Comparación de resultados

En la tabla 7.1 se presenta un resumen de los resultados de simulación, aplicando las dos estrategias de control tratado, y en la Tabla N° 7.2 se presenta un resumen de los resultados de las dos estrategias de control en tiempo real.

Tabla N° 7.1
Resumen de resultados de simulación de las dos técnicas de control

Estrategia	t_s (Seg.)	Sobrepico (%) de las salidas controladas
Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	0.9	Velocidad del motor DC (1%)
Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)	1.5	Velocidad del motor DC (0%)

Fuente: Autoría propia.

De los resultados de simulación mostrados en las secciones 6.3 y 6.4 y presentados en la Tabla 7.1, se puede observar que la técnica de Control PID presenta ligeramente un tiempo de asentamiento de 0.9 segundos y un sobrepico pequeño de aproximadamente 1%; mientras que en el MRAC, el sobrepico es de 0 % y un tiempo de asentamiento de 1.5 segundos.

Tabla N° 7.2
Resumen de resultados de las dos técnicas de control en tiempo real

Estrategia	t_s (Seg.)	Error estacionario
Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	2.0	0.1
Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)	0.4	0.0

Fuente: Autoría propia.

De la Tabla N° 7.2, podemos observar que el tiempo de asentamiento y error estacionario son menores en el Control Adaptivo por Modelo de Referencia.

7.2 Conclusiones y recomendaciones

De lo indicado en la sección 7.1, podemos concluir que, considerando que la variable de interés es la velocidad del motor DC, se puede decir que, la técnica de Control por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de simulación presenta ligeramente una mejor respuesta, debido a que presenta perfecto seguimiento (0 % de sobrepico), aunque el tiempo de asentamiento es ligeramente mayor que el PID, que en realidad no es significativo, ya que el tiempo de asentamiento de aproximadamente 1.5


segundos es razonable en el control de velocidad del motor DC; por lo que en este caso, el MRAC sería el más apropiado.

Igualmente, en el caso de las respuestas en tiempo real para trayectorias variantes, se puede concluir que la técnica del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) es mejor que el PID, con un tiempo de asentamiento de 0.4 segundos y un error estacionario nulo.

Finalmente podemos sugerir que para trabajos futuros se utilicen otros algoritmos alternativos como Control Fuzzy y Control Neuronal.



VIII. REFERENCIALES

- [1] ARCE RUBIO, A., VIANNA RAFFO, G. **Manual Avanzado de Simulink para la asignatura Fundamentos de Automática.** Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, España. 2009.
- [2] ASTROM K., WITTENMARK B. **Adaptive Control.** Second Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1989.
- [3] BENITES SARAIVA, Nicanor. **Control de Potencia MPPT y SVPWM, aplicado a un Sistema Eólico-Solar Autónomo.** Universidad Nacional del Callao, Perú. 2017.
- [4] CAMPOS DANIEL, U. **Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD.** Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 9 (1-9). 2006.
- [5] CARDONA HERRERA, Sebastián., OSPINA HURTADO, Steven. **Construcción de Módulo Convertidor CC-CC Elevador, para Prácticas en el Laboratorio del Programa Ingeniería Mecatrónica Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.** 2015.
- [6] DÍAZ NARVAEZ, Heider y DIEZ CARDONA, Fabián. **Análisis, Modelado, Simulación y Validación de un Sistema de Generación de Energía Solar Autónomo. Caso: Universidad Autónoma de Occidente,** Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali. 2007.
- [7] ERICKSON Robert., MAKSIMOVIC Dragan. **Fundamentals of Power Electronics.** (second edition). New York, EE.UU: Kluwer Academic Publishers. 2004. 
- [8] LÓPEZ GUILLÉN, Maria E. **Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua.** Departamento de Electrónica, Universidad Nacional de la Plata, Argentina. 2003.

- [9] LAJARRA VIZCAÍNO, José., PELIGRÍ SEBATIÁ, José. **LabVIEW. Entorno gráfico de programación.** Alfaomega-marcombo, México-Barcelona. 2007.
- [10] MARTÍNEZ BUENO, Angel. **Identificación experimental de sistemas.** Universidad de Alicante, España. 2011.
- [11] MATHWORKS. **Simulink Getting Started Guide. Matlab & Simulink.** MathWorks, Inc. 2016.
- [12] OGATA, Katushiko. **Ingeniería de Control Moderna.** Tercera edición, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México, Nueva York. 1998.
- [13] TORRENTE ARTERO, Óscar. **ARDUINO. Curso práctico de formación.** Primera edición, Alfaomega, México. 2013.

Aut

IX. APÉNDICES

APÉNDICE A

Programa en Matlab de Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

(Autoría propia)

```
% CONTROL PID DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DC
% PIDmotor.m
clear all; close all; clc
num=78.123;
den=[1 17.687 78.1689];
Kp=1.3674;
Ki=6.4;
Kd=0.1319;
numc=[Kd, Kp, Ki];
denc=[1 0];
Gc=tf(numc,denc)

%lazo abierto
numa=conv(num,numc);
dena=conv(den,denc);
Ga=tf(numa,dena)

%lazo cerrado
[numac,denac]=cloop(numa,dena);
Gac=tf(numac,denac)
step(numac,denac);
title('Control PID de veloc. motor DC')
grid;
```

APÉNDICE B

Programa en Matlab de Control por Modelo de Referencia (MRAC)

(Autoría propia)

```
clear all; clc;
% vel_mrac_motor.m
% Simulación de Control de Velocidad MRAC del motor DC
% Modelado de Planta Real
numG=78.123;
denG=[1 17.687 78.1689];
G=tf(numG,denG)

% Calculo del Modelo de Referencia
mp=0.01;
ts=1;
ep=sqrt(log(mp)^2/(pi^2+log(mp)^2));
wn=4/(ts*ep);
numGm=[wn^2];
denGm=[1 2*ep*wn wn^2];
Gm=tf(numGm,denGm)

% Grafica
t=0:0.001:2;
r=[ones(1,ceil(length(t)/2)) ones(1,floor(length(t)/2))];
%yG=lsim(G,u,t);
yGm=lsim(Gm,r,t);
plot(t,r,'k',t,yGm,'r')
```

X. ANEXOS

Matriz de Consistencia

Título: "IDENTIFICACIÓN DEL MODELO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC ALIMENTADO MEDIANTE PANEL SOLAR"

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>General</p> <p>En muchas aplicaciones, el control de motores DC implica por un lado la exactitud en el control de velocidad o posición, y ello exige diseñar un controlador adecuado, y este a su vez necesita contar con un modelo muy cercano al comportamiento real. Determinar el modelo matemático mediante métodos analíticos, exige conocer sus parámetros, como la inercia, constante de torque, resistencia de armadura o de campo, etc.</p> <p>Otro de los problemas que se presenta en el control de motores o de cualquier otra aplicación, es que la energía que se consume proviene de energías fósiles, así como el incremento del costo, a lo que hay que sumarle el aumento de la contaminación ambiental, situación que estaría contraviniendo las recomendaciones de mitigar el efecto invernadero.</p>	<p>Objetivo general</p> <p>El objetivo general del presente trabajo es diseñar e implementar controladores de velocidad de un motor DC, alimentado mediante panel solar.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>Los objetivos específicos del presente trabajo son:</p> <p>b1. Modelar e implementar un sistema de alimentación con panel solar.</p> <p>b2. Identificar el modelo de un motor DC.</p> <p>b3. Diseñar e implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC y simular sus respuestas en lazo cerrado.</p> <p>b4. Implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC en tiempo real y analizar sus respuestas en lazo cerrado.</p>	<p>H.E.1: "El modelado e implementación de un sistema de alimentación mediante panel solar, permitirá contar con energía eléctrica regulada y procedente de una fuente no contaminante, necesaria para alimentar a un motor DC".</p> <p>H.E.2: "El proceso de identificación del modelo del motor DC, permitirá obtener una respuesta de velocidad muy cercana al comportamiento real del motor".</p> <p>H.E.3: "El diseño de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar a nivel de simulación la velocidad del modelo del motor DC en lazo cerrado.</p> <p>H.E.4: "La implementación de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar la velocidad del motor DC en lazo cerrado y en tiempo real.</p>	<p>Variables dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica ◊ Velocidad del motor sin carga y con carga <p>Variables Independientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Energía solar fotovoltaica generada por el panel solar ◊ Señal de control generada por el controlador de velocidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelar e implementar el sistema de alimentación con panel solar • Identificar el modelo de un motor DC con encoder óptico • Diseñar e implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC y simular sus respuestas en lazo cerrado. • Implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC en tiempo real y analizar sus resultados. • Efectuar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

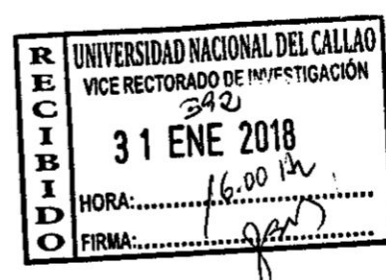


FEV 2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“IDENTIFICACIÓN DEL MODELO Y CONTROL DE
VELOCIDAD DE UN MOTOR DC ALIMENTADO
MEDIANTE PANEL SOLAR”

AUTOR: M. SC., ING. NICANOR RAÚL, BENITES SARAVIA

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01/11/2015 al 31/10/2017)

(RESOLUCIÓN RECTORAL N° 820-2015-R)

CALLAO, (2017)

I.	ÍNDICE	1
1.1	ÍNDICE DE FIGURAS	4
1.2	ÍNDICE DE TABLAS	7
II.	RESUMEN y ABSTRACT	8
III.	INTRODUCCIÓN	10
3.1	Planteamiento del Problema de Investigación	10
3.2	Objetivos y Alcances de la Investigación	11
3.2.1	Objetivos	11
3.2.2	Alcances	11
3.3	Importancia y Justificación de la Investigación	12
3.3.1	Importancia	12
3.3.2	Justificación	13
3.4	Formulación de la Hipótesis	13
3.4.1	Hipótesis general	13
3.4.2	Hipótesis específicas	13
IV.	MARCO TEÓRICO	15
4.1	Energía Solar Fotovoltaica	15
4.2	Identificación de Sistemas	17
4.2.1	El proceso de identificación	18
4.2.2	Métodos de identificación	20
4.2.3	Identificación no paramétrica	21
4.2.4	Identificación paramétrica	22
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1	Modelado del Panel Solar Fotovoltaico	24
5.1.1	Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) en el punto de máxima potencia	26
5.1.2	Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) mediante las ecuaciones de corriente y voltaje	28
5.2	Diseño del regulador de carga para la alimentación del motor DC	31

5.2.1	Diseño del convertidor DC/DC Buck	31
5.2.2	Diseño del Control PID del convertidor DC/DC Buck	34
5.3	Identificación del modelo del motor DC con encoder óptico	38
5.3.1	Identificación no paramétrica del motor DC con encoder Óptico	38
5.3.2	Identificación paramétrica del motor DC con encoder óptico	45
5.4	Diseño del Sistema de Control PID de velocidad del motor DC	49
5.4.1	Introducción	49
5.4.2	Diseño del Controlador PID	49
5.5	Diseño del Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)	52
5.5.1	Introducción	52
5.5.2	Determinación del Modelo de Referencia	53
5.5.3	Determinación de la Ley de Control	53
5.6	Implementación del hardware utilizado para el control de Velocidad	54
5.7	Implementación del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) a nivel de software	59
5.8	Implementación del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de software	60
VI	RESULTADOS	61
6.1	Resultados del modelado del panel solar	61
6.2	Resultados de la implementación del sistema de alimentación con Panel Solar	62
6.3	Resultados de la identificación del modelo del motor DC	64
6.4	Resultados de la simulación del Control PID de velocidad del motor DC	69
6.5	Resultados de la simulación del Control MRAC de velocidad del motor DC	70

6.6	Resultados del Control PID de velocidad del motor DC en tiempo real	71
6.7	Resultados del Control MRAC de velocidad del motor DC en tiempo real	71
VII	DISCUSION	73
7.1	Comparación de resultados	73
7.2	Conclusiones y recomendaciones	74
VIII	REFERENCIALES	76
IX	APÉNDICES	78
	APÉNDICE A	78
	Programa en Matlab de Control Proporcional Integral Derivativo (PID) (Autoría propia)	78
	APÉNDICE B	79
	Programa en Matlab de Control por Modelo de Referencia (MRAC) (Autoría propia)	79
X	ANEXOS	80
	• Matriz de Consistencia	80

Jr

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 4.1 Componentes de una instalación fotovoltaica	15
Figura N° 4.2 Proceso de identificación	19
Figura N° 4.3 Diagrama de bloques para cada modelo	23
Figura N° 5.1 Panel solar	25
Figura N° 5.2 Circuito eléctrico de la celda fotovoltaica con carga	25
Figura N° 5.3 Circuito eléctrico del panel fotovoltaico con carga	27
Figura N° 5.4 Circuito eléctrico equivalente del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia con carga	27
Figura N° 5.5 Diagrama eléctrico del panel fotovoltaico con capacitor	29
Figura N° 5.6 Esquema de un convertidor DC/DC Buck	31
Figura N° 5.7 Modos de operación del convertidor DC/DC Buck	33
Figura N° 5.8 Esquema en lazo cerrado del convertidor Buck	35
Figura N° 5.9 Diagrama esquemático del convertidor DC/DC Buck	36
Figura N° 5.10 Arduino Nano V3.0	37
Figura N° 5.11 Módulo LM2596 (convertidor Buck DC)	37
Figura N° 5.12 Convertidor DC/DC Buck	37
Figura N° 5.13 Lectura del convertidor DC/DC Buck	38
Figura N° 5.14 Componentes del sistema de adquisición, tratamiento de datos e identificación	39
Figura N° 5.15 Circuito driver de potencia	39
Figura N° 5.16 Circuito sensor y convertidor F/V	40
Figura N° 5.17 Aspecto físico de la tarjeta de adquisición De datos NI USB 6008	40
Figura N° 5.18 Programa en LabVIEW para la adquisición e Identificación del modelo del motor DC	41
Figura N° 5.19 Gráfica de velocidad vs tiempo	42
Figura N° 5.20 Ventana del Toolbox de identificación de Matlab	42
Figura N° 5.21 Selección de la opción Time Domain data	43

Figura N° 5.22 Ventana de configuración e importación de los datos	43
Figura N° 5.23 Selección de la opción Process Model	44
Figura N° 5.24 Ventana de configuración de polos y ceros, así como la selección del retardo, entre otros	44
Figura N° 5.25 Resultados de la ejecución, en el que se aprecian los parámetros del modelo del motor DC	45
Figura N° 5.26 Selección del modelo polinomial (paramétrico)	46
Figura N° 5.27 Configuración de la estructura ARX	46
Figura N° 5.28 Respuesta de la estructura ARX (color verde)	47
Figura N° 5.29 Respuesta de la estructura OE	47
Figura N° 5.30 Estructura polinomial en tiempo discreto del ARX	48
Figura N° 5.31 Estructura polinomial en tiempo discreto del OE	48
Figura N° 5.32 Diagrama de bloques del Control PID acoplado a la planta	50
Figura N° 5.33 Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia	52
Figura N° 5.34 Tarjeta DAQ USB 6008	54
Figura N° 5.35 Módulo L298 (driver de potencia)	55
Figura N° 5.36 Esquema del módulo L298 (driver de potencia)	55
Figura N° 5.37 Circuito sensor de velocidad	56
Figura N° 5.38 Chip SG63525 (Generador PWM)	56
Figura N° 5.39 Motor DC Globe Motors con encoder óptico acoplado	57
Figura N° 5.40 Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware para el control de velocidad del motor DC	58
Figura N° 5.41 Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware del Control PID de velocidad del motor DC	59
Figura N° 5.42 Gráfica de Control de velocidad PID del motor DC	59
Figura N° 5.43 Diagrama de bloques en LabVIEW	60
Figura N° 6.1 Respuesta V-I del panel fotovoltaico	61
Figura N° 6.2 Respuesta P-V del panel fotovoltaico	62
Figura N° 6.3 Esquema del Control PID del convertidor Buck	

en Simulink	62
Figura N° 6.4 Voltaje de salida del convertidor Buck en Simulink	63
Figura N° 6.5 Corriente del ciclo de carga del convertidor Buck en Simulink	63
Figura N° 6.6 Lectura del convertidor DC/DC Buck	64
Figura N° 6.7 Resultado gráfico del proceso de identificación	65
Figura N° 6.8 Respuesta del modelo a una entrada escalón unitario	65
Figura N° 6.9 Representación del motor DC	66
Figura N° 6.10 Diagrama de bloques representativo del modelo de función de transferencia del motor DC	69
Figura N° 6.11 Respuesta del Sistema de Control PID frente a una entrada escalón unitario	70
Figura N° 6.12 Respuesta del Sistema MRAC de velocidad del motor DC	70
Figura N° 6.13 Salida controlada (velocidad del motor: amarillo) vs setpoint (velocidad de referencia: rojo)	71
Figura N° 6.14 Salida controlada (velocidad del motor: rojo) vs setpoint (velocidad de referencia: amarillo)	71

del

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 4.1 Estructura de los modelos paramétrico	23
Tabla N° 5.1 Características eléctricas del panel solar monocristalino SFM 90W de Singfo Solar Energy Sci & Tech Co, Ltd.	25
Tabla N° 5.2 Condiciones para modo continuo de conducción (MCC)	32
Tabla N° 7.1 Resumen de resultados de simulación de las dos técnicas de control	73
Tabla N° 7.2 Resumen de resultados de las dos técnicas de control en tiempo real	74

Aut.

II. RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se aborda el diseño y la implementación de un sistema control de velocidad de un motor DC alimentado por un regulador de carga tipo Buck, el cual tiene como entrada un panel solar de 90 Watts.

Entendiendo que en muchas aplicaciones de control de velocidad o de posición de motores, se exige que dicho control sea preciso, se ha optado por identificar el modelo del motor DC, usando para ello las herramientas de hardware y software disponibles, lo que ha permitido implementar las técnicas de Control Proporcional Integral Derivativo (PID) y el Control por Modelo de Referencia (MRAC), a nivel de simulación y en tiempo real, para lo cual se han usado Arduino, LabVIEW y Matlab.

Asimismo, considerando utilizar recursos de energías renovables, con la consiguiente ventaja de tener un sistema de alimentación autónoma, se optó por implementar un sistema de alimentación con panel solar fotovoltaico y un regulador de carga, que ha permitido generar una tensión DC de 12 voltios regulados, que alimentan al motor DC.

Los resultados muestran que la técnica de Control por Modelo de Referencia presenta mejores resultados, incluso para referencias variantes (trayectorias).

PALABRAS CLAVES: Panel Solar, Regulador de carga Buck, Motor DC, Control PID y MRAC

II. ABSTRACT

In the present research work, the design and implementation of a speed control system of a DC motor fed by a Buck type charge regulator, which has as input a 90 Watts solar panel is approached.

Understanding that in many applications of speed control or motor position, it is required that this control is accurate, we have chosen to identify the model of the DC motor, using the available hardware and software tools, which has allowed to implement the techniques of Integral Derivative Proportional Control (PID) and Control by Reference Model (MRAC), at simulation level and in real time, for which Arduino, LabVIEW and Matlab have been used.

Also, considering using renewable energy resources, with the consequent advantage of having an autonomous power system, it was decided to implement a power system with photovoltaic solar panel and a charge controller, which has allowed to generate a DC voltage of 12 volts regulated, that feed the DC motor.

The results show that the technique of Control by Reference Model presents better results, even for variable references (trajectories).

KEYWORDS: Solar Panel, Buck Charge Controller, DC Motor, PID Control and MRAC

III. INTRODUCCION

3.1 Planteamiento del Problema de Investigación

En muchas aplicaciones, el control de motores DC implica por un lado la exactitud en el control de velocidad o posición, y ello exige diseñar un controlador adecuado, y este a su vez necesita contar con un modelo muy cercano al comportamiento real. Determinar el modelo matemático mediante métodos analíticos, exige conocer sus parámetros, como la inercia, constante de torque, resistencia de armadura o de campo, etc. Algunos fabricantes tienen disponibles dicha información; sin embargo, no siempre se puede encontrar información, particularmente cuando se tiene un motor cuya descripción del fabricante o modelo no está disponible o se ha borrado.

Otro de los problemas que se presenta en el control de motores o de cualquier otra aplicación, es que la energía que se consume proviene de energías fósiles, así como el incremento del costo, a lo que hay que sumarle el aumento de la contaminación ambiental, situación que estaría contraviniendo las recomendaciones de mitigar el efecto invernadero.

La necesidad de contar con un modelo muy cercano al comportamiento real del motor DC, diseñar e implementar algoritmos de control adecuados para el control de velocidad o de posición de alto desempeño; así como disponer de fuentes de energía renovables para el control del motor DC, conduce a formular soluciones viables y técnicamente confiables. Particularmente en este trabajo, se trata del control de velocidad de un motor DC con encoder óptico.

En consecuencia, el problema a resolver, se puede dividir en sub-problemas: modelar e implementar el sistema de alimentación con panel solar, identificar el modelo del motor, diseñar e implementar controladores

PI y Adaptivo (que permita comparar sus desempeños). En tal sentido, es que se plantea la siguiente problemática:

¿Es posible modelar e implementar un sistema de alimentación con panel solar, identificar el modelo del motor DC, diseñar e implementar un Controlador Adaptivo que permita un mejor desempeño que un Controlador PID?

3.2 Objetivos y Alcances de la Investigación

3.2.1 Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es diseñar e implementar controladores de velocidad de un motor DC, alimentado mediante panel solar.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- b1. Modelar e implementar un sistema de alimentación con panel solar.
- b2. Identificar el modelo de un motor DC.
- b3. Diseñar e implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC y simular sus respuestas en lazo cerrado.
- b4. Implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC en tiempo real y analizar sus respuestas en lazo cerrado.

3.2.2 Alcances

La implementación del presente trabajo de investigación beneficiará a alumnos y docentes del área de Control, permitiendo fomentar la investigación en temas de identificación de sistemas dinámicos y energías

renovables. La investigación es básica y su codificación de acuerdo a la UNESCO es 04030601.

3.3 Importancia y Justificación de la Investigación

3.3.1 Importancia

Este proyecto surge con motivo de fomentar el uso de energías renovables en aplicaciones de Control Automático de Procesos o Plantas diversas.

En sistemas más complejos, como plantas de múltiples entradas y múltiples salidas (sistemas multivariables), la tarea de diseñar controladores se vuelve complicada, debido a que se tiene que contar con modelos precisos de la planta a ser controlada; sin embargo, modelar dichas plantas en forma analítica se vuelve difícil, incluso en determinados sistemas univariados de relativa complejidad. En tal sentido, una de las opciones a considerar es obtener mediante métodos experimentales el modelo del proceso o planta, denominados métodos de identificación de sistemas dinámicos.

Existen métodos paramétricos y no paramétricos de identificación del modelo de plantas o procesos, mediante los cuales podemos usar los datos adquiridos del procedimiento experimental y usarlos para obtener el modelo requerido. Dicho modelo resultará más cercano al comportamiento real del sistema, y permitirá diseñar el controlador o controladores en forma más exacta.

Por otro lado, entre los algoritmos de control podemos encontrar algoritmos de control clásicos como los PID, y algoritmos modernos de mayor rendimiento como los Óptimos, Adaptivos, Predictivos, etc. Estos últimos son generalmente más precisos y óptimos.

H.E.2: "El proceso de identificación del modelo del motor DC, permitirá obtener una respuesta de velocidad muy cercana al comportamiento real del motor".

H.E.3: "El diseño de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar a nivel de simulación la velocidad del modelo del motor DC en lazo cerrado.

H.E.4: "La implementación de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar la velocidad del motor DC en lazo cerrado y en tiempo real.

En consecuencia, las variables que se operan son las siguientes:

Variables dependientes:

- Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica
- Velocidad del motor sin carga y con carga

Variables independientes:

- Energía solar fotovoltaica generada por el panel solar
- Señal de control generada por el controlador de velocidad



IV. MARCO TEÓRICO

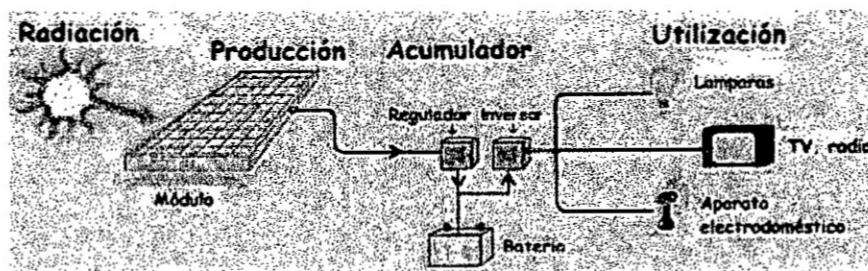
4.1 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías de energía renovable más populares, ya que utiliza la energía que recibimos del sol, la cual se encuentra disponible prácticamente en cualquier lugar. Una celda solar fotovoltaica, con base en el efecto fotoeléctrico convierte la energía que recibe del sol en energía eléctrica.

Estas celdas o colectores son semiconductores sensibles a la luz solar; de manera que cuando se expone a esta, se produce en las celdas una circulación de corriente eléctrica entre sus dos caras. Los componentes de un sistema fotovoltaico dependen del tipo de aplicación conectada o no a la red y de las características de instalación [6]. Una instalación fotovoltaica aislada está formada por los equipos destinados a producir, regular, acumular y transformar la energía eléctrica, según se puede apreciar en la Figura N° 4.1, y que brevemente se anotan a continuación:

Figura N° 4.1

Componentes de una instalación fotovoltaica.



Fuente: Díaz Narvaez, Díez Cardona [6]

✓ Celdas Fotovoltaicas

Una celda fotovoltaica es donde se produce la conversión fotovoltaica.

Las más utilizadas son las realizadas con silicio cristalino. La incidencia de la radiación luminosa sobre la celda genera una diferencia de potencial y una corriente continua aprovechable. Actualmente se fabrican celdas solares con una eficiencia mayor al 30%. La energía solar fotovoltaica es principalmente utilizada como una fuente de energía alternativa para sistemas eléctricos residenciales o industriales. Además, otra aplicación importante del uso de esta fuente de energía es en los sistemas de transporte, ésta aplicación se ha dado a conocer en los vehículos eléctricos alimentados por paneles solares los cuales son mencionados a menudo como una alternativa a los vehículos de combustión interna.

✓ **Paneles fotovoltaicos**

Son un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí mediante configuraciones serie, paralelo o serie-paralelo, dependiendo si se quiere incrementar el voltaje, corriente o ambas. La orientación de los paneles solares de acuerdo a la ubicación y latitud se realiza buscando una mayor radiación de la energía solar sobre los paneles solares y mejorar su eficiencia.

✓ **Regulador de carga o convertidor DC/DC**

Tiene por función proteger a las baterías contra las sobrecargas y las descargas, produciendo una diferencia de potencial (voltaje) estable a la salida del convertidor DC/DC.

✓ **Baterías**

Son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica. Estas pueden cargarse de energía en el día y descargarse en la noche.

✓ **Inversor**

Convierte la tensión o voltaje DC regulada (12, 24 o 48 voltios) y lo convierte a tensión AC (220 voltios a 60 Hz.). El dimensionamiento de una

de

instalación aislada requiere disponer de información relativa al consumo previsto de energía y de la disponibilidad media de radiación solar a lo largo del año.

4.2 Identificación de Sistemas

En muchas ocasiones, puede ser difícil o dificultoso obtener el modelo matemático de un proceso o planta, particularmente si el proceso es complejo o no se conocen sus características. Tener un modelo matemático muy cercano al sistema físico es de vital importancia, debido a que en función de dicho modelo diseñaremos el controlador correspondiente y verificaremos si la respuesta del sistema de control en lazo cerrado sigue a una consigna o referencia. En tal sentido, podemos anotar que existen dos métodos de identificación de modelos:

- **Modelado teórico**

Viene a ser un método analítico, en el que se recurre a las leyes físicas para describir el comportamiento dinámico de un proceso físico.

- **Identificación del sistema**

Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos del proceso o planta en estudio. Dicho modelo debe reproducir con suficiente exactitud, las características dinámicas del sistema físico en estudio [8].

El modelado teórico tiene un campo de aplicación restringido a procesos muy sencillos de modelar, o a aplicaciones en que no se requiera gran exactitud en el modelo obtenido. En muchos casos, la estructura del modelo obtenido a partir del conocimiento físico de la planta posee un conjunto de parámetros desconocidos y que solo se pueden determinar

experimentando sobre el sistema real. De allí la necesidad de recurrir a los métodos de identificación de sistemas.

4.2.1 El proceso de identificación

En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:

1. Obtención de datos de entrada – salida

Para ello se debe excitar al sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.

2. Tratamiento previo de los datos registrados

Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de “preparar” los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.

3. Elección de la estructura del modelo

En esta parte es necesario considerar si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, entonces el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.

4. Obtención de los parámetros del modelo

Prosiguiendo, se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

5. Validación del modelo

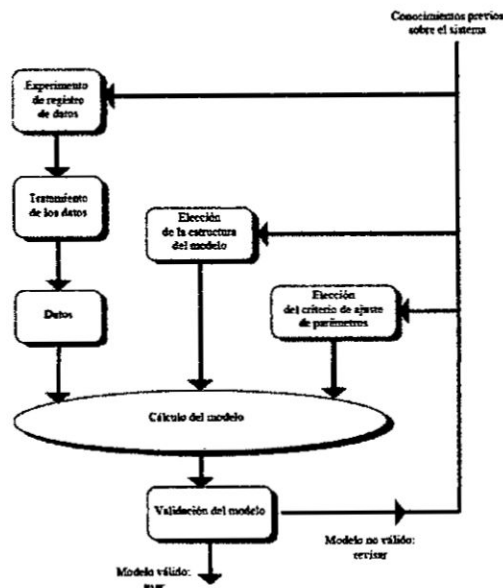
Finalmente, el último paso es determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en

cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el punto correspondiente. Por tanto, el proceso de identificación es un proceso iterativo, cuyos pasos pueden observarse en el organigrama de la Figura 4.2.

Figura N° 4.2
Proceso de identificación



Fuente: López G. [8]

4.2.2 Métodos de identificación

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios:

- ❖ Dependiendo del tipo de modelo obtenido:

1. Métodos no paramétricos

Permiten obtener modelos no paramétricos del sistema bajo estudio. Algunos de estos métodos son: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier, etc.

2. Métodos paramétricos

Permiten obtener modelos paramétricos. Estos métodos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y por último de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

- ❖ Dependiendo de la aplicación:

1. Métodos de identificación off-line (a posteriori)}

Utilizados en aquellas aplicaciones en que no se requiera un ajuste continuado del modelo. En estos casos, se realiza la identificación previa de la planta, considerándose que la validez de los parámetros obtenidos no se verá alterada con el paso del tiempo.

2. Métodos de identificación on-line (identificación recursiva)

Utilizados en aquellas aplicaciones en las que los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos de entrada-salida obtenidos durante la evolución del proceso. Son muy utilizados en sistemas de Control Adaptivo o Adaptativo.

3. Dependiendo del criterio de ajuste de los parámetros

Existen diversos métodos matemáticos para ajustar los parámetros de una estructura a un conjunto de datos de entrada-salida. Algunos de los más utilizados en el campo de la identificación son el método de mínimos cuadrados y el método de las variables instrumentales.


4.2.3 Identificación no paramétrica

Se pueden clasificar en:

- **Identificación no paramétrica en el dominio del tiempo**

Mediante esta técnica de identificación se pretende obtener la respuesta al impulso del sistema, o bien la respuesta al escalón del mismo (pudiendo obtenerse esta última mediante una integración de la primera). Para ello, debe registrarse la evolución temporal de la salida del sistema tras la aplicación de una señal impulso o escalón. Obviamente, la imposibilidad de conseguir este tipo de señales en la práctica, lleva a utilizar un método indirecto para obtener la respuesta impulsiva, conocido como análisis de correlación.

- **Identificación no paramétrica en el dominio de la frecuencia**

En este caso, el modelo resultante es una representación de la respuesta en frecuencia del sistema, obtenida mediante la aplicación de señales de entrada sinusoidales de distintas frecuencias. Cuando no sea posible aplicar este tipo de entradas, puede recurrirse a la aplicación de un ruido blanco, que permite obtener la respuesta en frecuencia mediante el conocido análisis  espectral. Este análisis se basa en la realización de la transformada de Fourier de las funciones de covarianza de la entrada y la salida y la correlación entre la entrada y la salida.

De estas dos técnicas, se utilizará la identificación no paramétrica en el dominio del tiempo, particularmente la respuesta al escalón.

4.2.4 Identificación paramétrica

Los modelos paramétricos a diferencia de los anteriores, quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salida y perturbaciones). En muchas ocasiones es necesario realizar la identificación de un sistema del cual no se tiene ningún tipo de conocimiento previo. En estos casos, se suele recurrir a modelos estándar, cuya validez para un amplio rango de sistemas dinámicos ha sido comprobada experimentalmente. Generalmente estos modelos permiten describir el comportamiento de cualquier sistema lineal. La dificultad radica en la elección del tipo de modelo (orden del mismo, número de parámetros, etc.) que se ajuste satisfactoriamente a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

Se pueden clasificar en:

- **Modelos paramétricos en el dominio discreto**

En este caso, los datos que sirven de base para la identificación se obtienen por muestreo. Es el más usado.

- **Modelos paramétricos en el dominio continuo**

No es muy frecuente; sin embargo, siempre es posible realizar una transformación del dominio discreto al continuo o viceversa.

Entre los tipos de modelos basados en una determinada estructura, podemos encontrar a los modelos: ARX, OE (Output Error), ARMAX, BJ (Box Jenkins), como se puede apreciar en la Tabla N° 4.1.

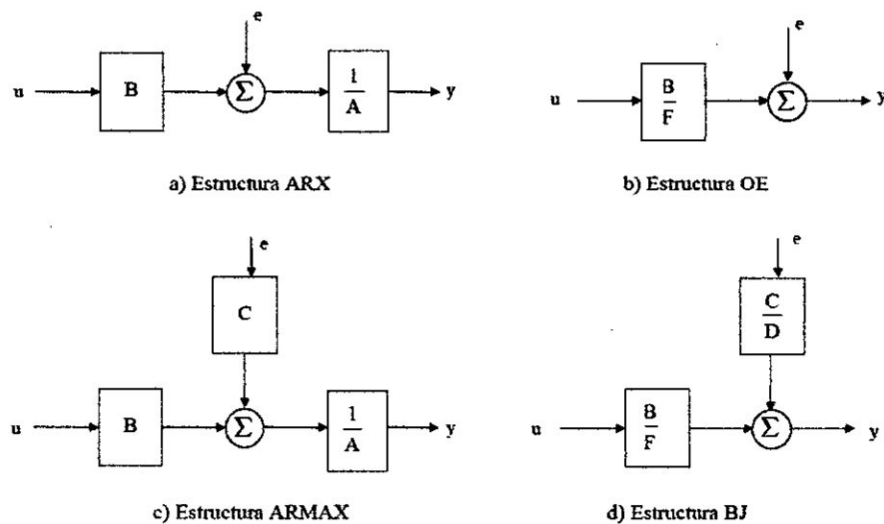
Tabla N° 4.1
Estructuras de los modelos paramétricos

Tipo de modelo	Condición	Estructura resultante
Modelo ARX	$F(q^{-1})=D(q^{-1})=C(q^{-1})=1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t)$
Modelo Output Error (OE)	$C(q^{-1})=D(q^{-1})=A(q^{-1})=1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + e(t)$
Modelo ARMAX	$F(q^{-1})=D(q^{-1})=1$	$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + C(q^{-1}) \cdot e(t)$
Modelo Box Jenkins (BJ)	$A(q^{-1})=1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t)$

Fuente: López G., Martínez B. [8][10]

En la Figura N° 4.3 se presenta el diagrama de bloques correspondiente a cada uno de los modelos paramétricos de la Tabla N° 4.1.

Figura N° 4.3
Diagrama de bloques para cada modelo



Fuente: López G. [10]

V. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada es la siguiente:

2. Modelado del Panel Solar Fotovoltaico.
3. Diseño del regulador de carga para la alimentación del motor DC.
4. Identificación del modelo del motor DC con encoder óptico
5. Diseño del Sistema de Control PID de velocidad del motor DC
6. Diseño del Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)
7. Implementación del hardware utilizado para el control de velocidad
8. Implementación del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) a nivel de software.
9. Implementar del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de software.
10. Efectuar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

5.1 Modelado del Panel Solar Fotovoltaico

En esta subsección se aborda el modelado del panel solar fotovoltaico SFM 90W, y para ello se ha considerado la hoja de especificaciones proporcionada por el fabricante Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., Ltd, tal como se muestra en la Tabla N° 5.1.

En la Figura N° 5.1 (a) y 5.1 (b) se muestran fotografías del panel solar SFM 90W de la parte frontal y posterior.

El modelo de la celda fotovoltaica, se puede representar mediante el circuito de la figura N° 5.2.

Tabla N° 5.1

Características eléctricas del panel solar monocristalino
SFM 90W de Singfo Solar Energy Sci & Tech Co., Ltd

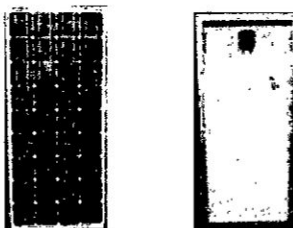
Potencia máxima (P_{max})	90W
Voltaje en P_{max} (V_{mpp})	18.1V
Corriente en P_{max} (I_{mpp})	4.98A
Corriente en corto circuito (I_{sc})	5.47A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	21.8V
Rango de temperatura	-40 a 85°C

Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.1

Panel solar

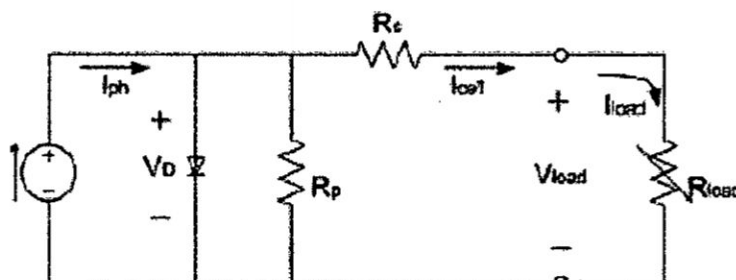
(a) Vista frontal, (b) Vista posterior del panel fotovoltaico



Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.2

Circuito eléctrico de la celda fotovoltaica con carga



Fuente: Autoría propia

Siendo R_s la resistencia en serie que se conecta con la carga y R_p la resistencia de los cristales de la unión pn que constituyen la celda solar fotovoltaica.

El modelo eléctrico de la celda solar fotovoltaica se puede expresar matemáticamente por la ecuación 5.1, así:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q}{AKT}(V_{load} + I_{cell}R_s)} - 1 \right] - \left(\frac{V_{load} + I_{cell}R_s}{R_p} \right) \quad (5.1)$$

Siendo:

I_{cell} : Corriente de salida de la celda

I_{ph} : Corriente generada por la luz

I_0 : Corriente de saturación de la celda

q : Carga eléctrica

V_{load} : Voltaje de salida de la carga

A : Constantes ideales

K : Constante de Boltzmann

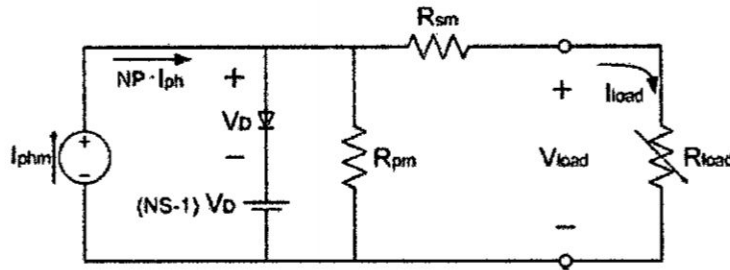
T : Temperatura de la celda en °K

5.1.1 Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (FV) en el punto de máxima potencia.

La agrupación de celdas fotovoltaicas en serie-paralelo forma el panel fotovoltaico, y se puede representar mediante el circuito de la Figura N° 5.3, donde R_{sm} es la resistencia en serie equivalente, R_{pm} es la resistencia en paralelo equivalente del panel, NP es el número de celdas en paralelo, NS es el número de celdas en serie e I_{phm} es la corriente suministrada por la fuente de corriente del panel solar.

Figura N° 5.3

Circuito eléctrico del panel fotovoltaico con carga

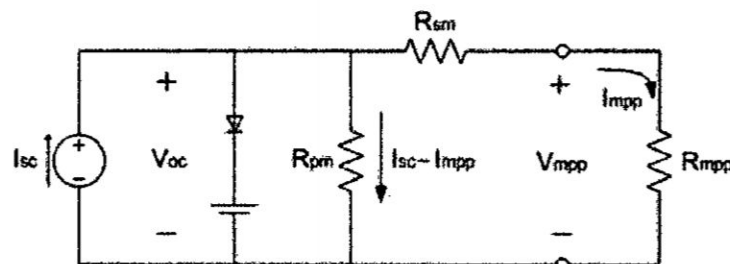


Fuente: Autoría propia

En el proceso de producción de energía se debe buscar siempre que sea posible el punto de máxima potencia. Para obtener el punto de máxima potencia, se considera que R_{pm} es mucho mayor que R_{sm} , la fuente de corriente del panel solar I_{phm} se puede aproximar a la corriente máxima en corto circuito I_{sc} (salida cortocircuitada) y el voltaje del diodo de polarización más el voltaje de la fuente $(NS-1)V_D$ se puede aproximar al voltaje máximo en circuito abierto V_{oc} (tensión en los terminales de conexión sin carga) [12]. Por consiguiente, el circuito eléctrico equivalente para operación en el punto de máxima potencia se presenta en la Figura N° 5.4.

Figura N° 5.4

Circuito eléctrico equivalente del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia con carga



Fuente: Autoría propia

De la Figura N° 5.4 se puede obtener las expresiones para R_{sm} y R_{pm} , representadas por las ecuaciones 5.2 y 5.2.

$$R_{sm} = \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{21.8V - 18.1V}{4.98A} = 0.74\Omega \quad (5.2)$$

$$R_{pm} = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{mpp}} = \frac{21.8V}{5.47A - 4.98A} = 44.49\Omega \quad (5.3)$$

De la Figura N° 5.4 se puede realizar los análisis de circuito abierto y cortocircuito.

✓ **Tensión a circuito abierto del generador**

Del circuito de la Figura N° 5.4 se puede obtener que:

$$V_{mpp} \approx R_{sm} V_{oc} \approx 0.74 V_{oc} \quad (5.4)$$

✓ **Corriente en cortocircuito del generador**

Asimismo, considerando que la corriente I_{sc} es igual a la suma de las corrientes que circulan por las resistencias R_{pm} y R_{sm} , tendremos:

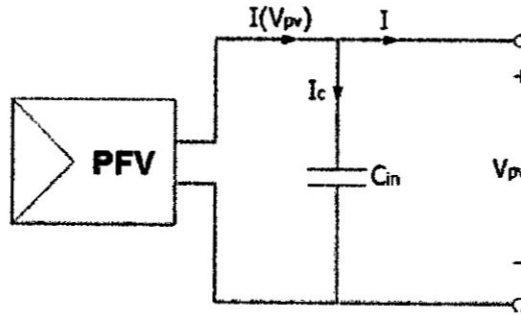
$$\begin{aligned} I_{sc} &= I_{R_{pm}} + I_{R_{sm}} \\ \Rightarrow V_{R_{pm}} &= V_{R_{sm}} \\ (I_{sc} - I_{mpp})R_{pm} &= R_{sm} \cdot I_{mpp} \\ I_{mpp} &= \frac{R_{pm}}{(R_{sm} + R_{pm})} I_{sc} ; \quad I_{mpp} = 0.9836 I_{sc} \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.1.2 Análisis para la obtención del modelo del panel fotovoltaico (PFV) mediante las ecuaciones de corriente y voltaje.

Considerando las ecuaciones 5.2 a 5.5 y la conexión del capacitor C_{in} (ver Figura N° 5.5), se pueden obtener las ecuaciones 5.6 a 5.8,

considerando que la temperatura y la radiación solar es constante.

Figura N° 5.5
Diagrama eléctrico del panel fotovoltaico con capacitor



Fuente: Autoría propia

$$I(V_{pv}) = \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (5.6)$$

$$V_{pv}(I) = bV_{oc} \ln \left[\frac{I_{sc} - \left(I - I e^{-\left(\frac{1}{b}\right)} \right)}{I_{sc}} \right] + V_{oc} \quad (5.7)$$

$$P(V_{pv}) = V_{pv} I_{pv} = \frac{V_{pv} I_{sc} - V_{pv} I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (5.8)$$

Donde:

I: corriente suministrada por el panel

V_{pv}: voltaje de operación del panel

V_{oc}: voltaje del panel en circuito abierto

I_{sc}: corriente del panel en cortocircuito

b: constante característica del panel

P: potencia de salida del panel

Asimismo, el capacitor C_{in} conectado a los terminales del panel fotovoltaico, tiene la finalidad de que el panel funcione como una fuente de voltaje. A salida del panel se conectará un convertidor DC-DC, que permita regular el voltaje para alimentar al motor DC.

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{in}} (I(V_{pv}) - I) \quad (5.9)$$

Para obtener la ecuación de voltaje cuando el panel proporciona la máxima potencia, tenemos que calcular la derivada parcial de la potencia de salida del panel con respecto al voltaje V_{pv} , así:

$$\frac{\partial P}{\partial V_{pv}} = \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} - \frac{V_{pv} e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{V_{oc} b - V_{oc} b e^{\left(\frac{V_{pv} - 1}{bV_{oc}}\right)}} = 0 \quad (5.10)$$

Resolviendo la ecuación 5.10, se obtiene la ecuación que describe el voltaje óptimo del panel, dado por:

$$V_{op} = V_{oc} + bV_{oc} \ln \left[b - b e^{-\left(\frac{1}{b}\right)} \right] \quad (5.11)$$

Por lo que V_{op} sustituye a V_{pv} en la ecuación 5.6 para obtener la corriente óptima en el panel. Por consiguiente, la potencia máxima del panel viene dada por:

$$P_{max} = V_{op} I_{op} = V_{op} \frac{I_{sc} - I_{sc} e^{\left(\frac{V_{op} - 1}{bV_{oc}}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{b}\right)}} \quad (5.12)$$

La constante característica b del panel fotovoltaico, se obtiene despejando de la ecuación 5.12, según se muestra en la ecuación 5.13.

$$b = \frac{\frac{V_{op}}{V_{oc}} - 1}{L\eta \left[1 - \frac{I_{op}}{I_{sc}} \right]} \quad (5.13)$$

Siendo:

I_{op} : corriente óptima en el punto de máxima potencia I_{mpp}

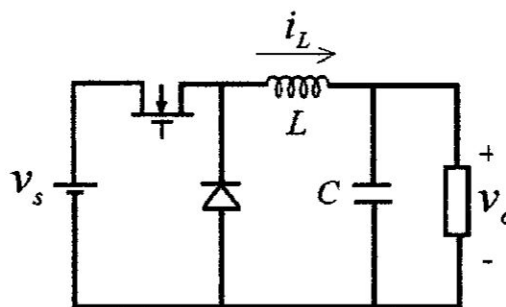
V_{op} : voltaje óptimo en el punto de máxima potencia V_{mpp} .

5.2 Diseño del regulador de carga para la alimentación del motor DC

5.2.1 Diseño del convertidor DC/DC Buck

El convertidor DC/DC Buck es uno que se encarga de reducir la tensión de entrada V_s a un nivel de tensión inferior o igual a V_o , el cual debe mantenerse constante si se supone un capacitor C muy grande en el filtro de salida. La Figura N° 5.6 muestra el convertidor Buck.

Figura N° 5.6
Esquema de un convertidor DC/DC Buck



Fuente: Campos D. [4]

La tensión de salida viene dada por:

$$v_o = Uv_s \quad (5.14)$$

El modelado matemático del convertidor Buck se realiza asumiendo que este trabaja en modo-continuo de conducción (MCC) [4], es decir la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor poseen un valor constante, y una parte fluctuante alrededor de un valor promedio. Esta condición de operación está ligada a los valores de la inductancia, la resistencia de carga del convertidor y a la frecuencia de conmutación, por la relación mostrada en la Tabla N° 5.2.

Tabla N° 5.2
Condiciones para modo continuo de
conducción (MCC)

Buck	Boost	Buck/Boost
$\frac{2Lf}{R} > (1-U)$	$\frac{2Lf}{R} > U(1-U)^2$	$\frac{2Lf}{R} > (1-U)^2$

Fuente: Campos D. [4]

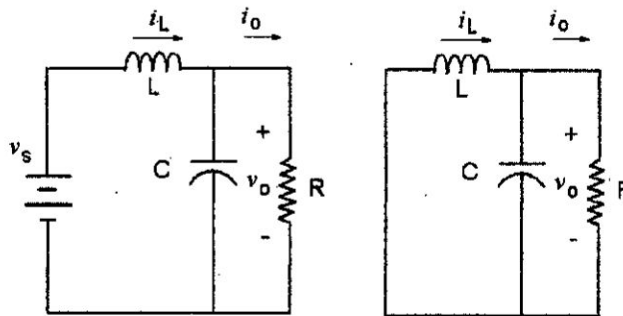
La técnica utilizada para obtener el modelo del convertidor se basa en espacio de estados, y en definir 2 condiciones de operación del interruptor activo Q: ON ($\mu=1$) y OFF ($\mu=0$). Enseguida, se toman 2 estados en el sistema: corriente en el inductor i_L y el voltaje de salida v_o (el cual también representa el voltaje en el capacitor). Los circuitos equivalentes para ambas condiciones de operación se muestran en la Figura N° 5.7.

Las ecuaciones que corresponden al convertidor DC/DC Buck, vienen dadas por:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L} + \frac{V_s}{L} \mu \quad (5.15)$$

$$\frac{dV_o(t)}{dt} = -\frac{V_o}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (5.16)$$

Figura N° 5.7
Modos de operación del convertidor DC/DC Buck
(Izq. On, Der. Off)



Fuente: Campos D. [4]

La variable de control viene representada por $\mu=0$ o $\mu=1$ determinando el estado del interruptor Q.

El modelo promedio de las ecuaciones (5.15) y (5.16) incluyendo variaciones en el voltaje de alimentación, está dado por:

$$x_1 = -\frac{x_2}{L} + \frac{V_s}{L}u + \frac{\hat{v}_s}{L}u \quad (5.17)$$

$$x_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (5.18)$$

Por otro lado, considerando la aproximación lineal de (5.17) y (5.18) alrededor de la condición nominal de operación (V_s, V_o, U, R) , se obtiene el modelo lineal en espacio de estados:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_s}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{u} + \begin{pmatrix} \frac{U}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{v}_s \quad (5.19)$$

$$y = (0 \quad 1) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

Aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones (5.19) y (5.20), y aplicando el teorema de superposición, se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{u}(s)} = \frac{V_0}{U} \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (5.21)$$

$$G_2(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{v}_s(s)} = U \cdot \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (5.22)$$

5.2.2 Diseño del Control PID del convertidor DC/DC Buck

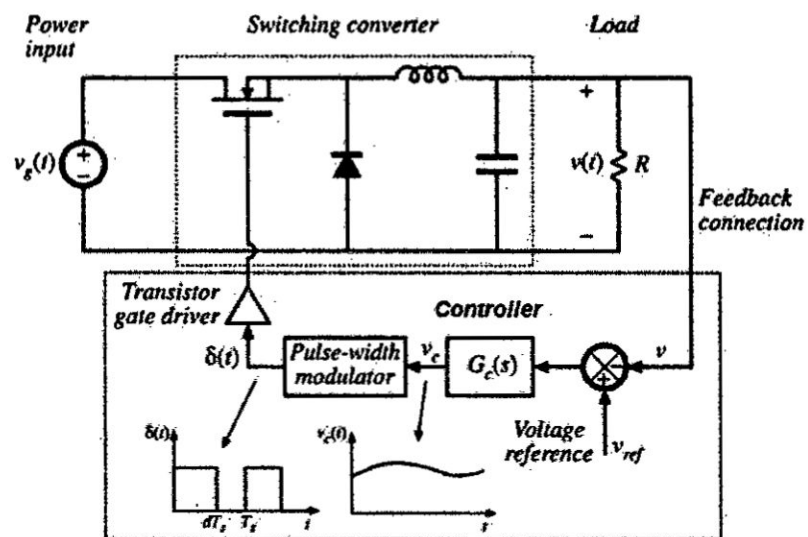
El esquema del sistema de control genérico para el convertidor Buck, se muestra en la Figura N° 5.8, en el que encuentra el convertidor Buck (planta) y el sistema de control realimentado, conformado por el bloque de diferencia entre el setpoint y la señal sensada, el controlador propiamente dicho, el PWM, el driver de gatillado o disparo para el mosfet [7].

El esquema del convertidor DC-DC Buck específico se muestra en la Figura N° 5.9. Como se puede observar, consta de dos Buck, uno mayor compuesto por tres MOSFET en configuración serie-paralelo, un sensor de corriente solar, un sensor de voltaje de salida, un MOSFET de protección de carga y el ARDUINO NANO v3.0 [13]. El segundo Buck está compuesto por un Buck LM2596, que recibe una tensión de entrada de 12 V y produce a su salida una tensión de 5V para alimentar al ARDUINO

NANO v3.0. En la Figura N° 5.10 se muestra al Arduino nano v3.0, y en la Figura N° 5.11 se presenta al pequeño convertidor DC/DC Buck LM2596.

Figura N° 5.8

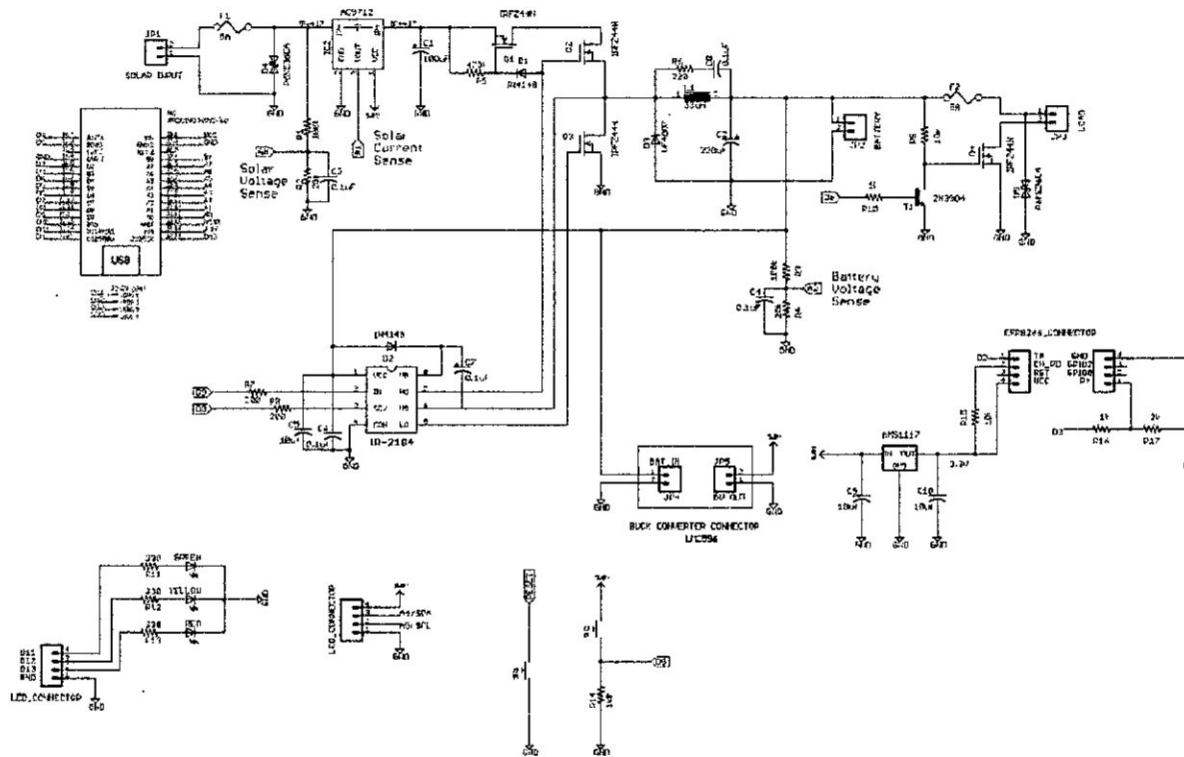
Esquema en lazo cerrado del convertidor Buck



Fuente: Córdova S., Ospina S. [5]

Handwritten signature

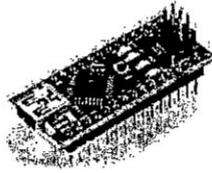
Figura N° 5.9
Diagrama esquemático del convertidor DC-DC Buck



Fuente: Benites N. [3]

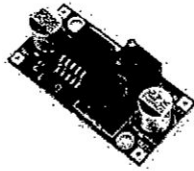
Handwritten signature

Figura N° 5.10
Arduino Nano V3.0



Fuente: Arduino

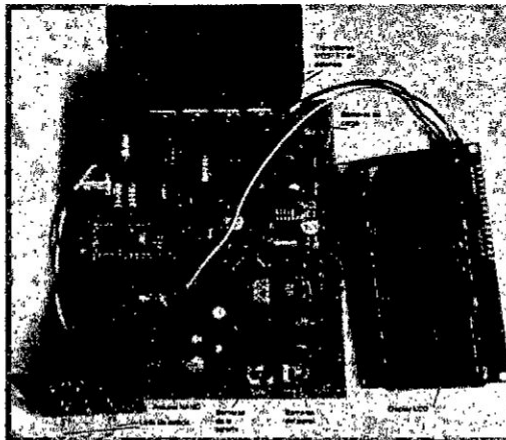
Figura N° 5.11
Módulo LM2596 (Convertidor Buck DC)



Fuente: Alibaba.com

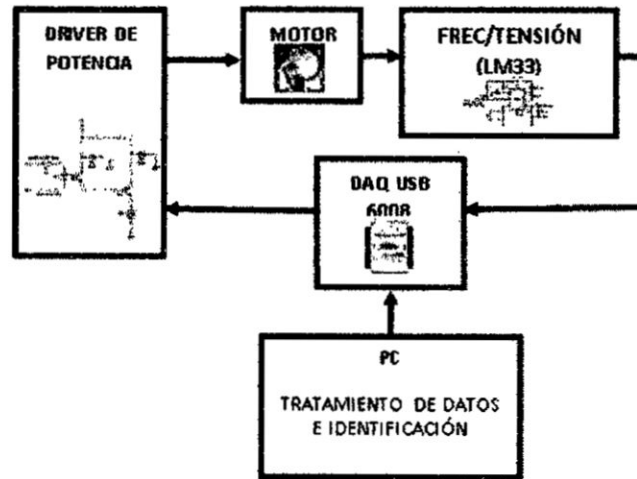
La implementación del convertidor DC/DC Buck se puede apreciar en la Figura N° 5.12.

Figura N° 5.12
Convertidor DC/DC Buck



Fuente: Benites N. [3]

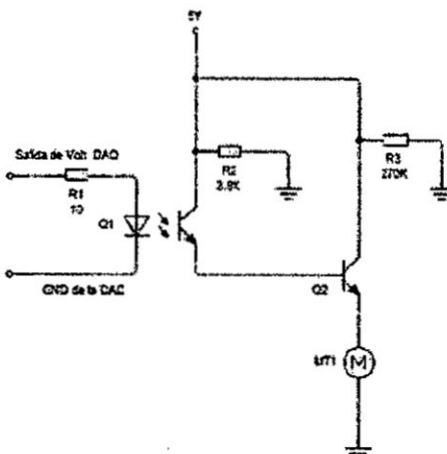
Figura N° 5.14
**Componentes del sistema de adquisición,
 tratamiento de datos e identificación**



Fuente: Autoría propia

El circuito sensor está conformado por el CI LM331 (convertidor de frecuencia en voltaje), que es el que captura el movimiento rotacional del eje del motor, mediante la información de frecuencia que envía el codificador óptico (insertado en el motor DC).

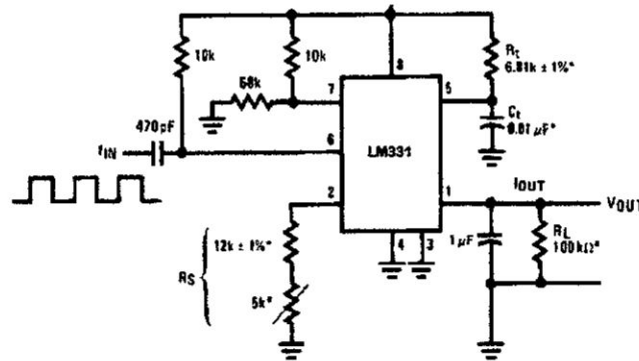
Figura N° 5.15
Circuito driver de potencia



Fuente: Autoría propia

La salida del convertidor LM 331 produce variaciones de voltaje que se conectan a la entrada analógica del DAQ USB 6008 (ver Figura N° 5.16).

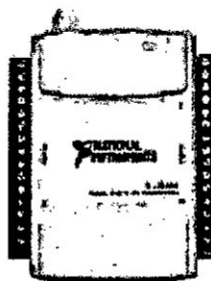
Figura N° 5.16
Circuito sensor y convertidor F/V



Fuente: Fairchild Semiconductor

La tarjeta de adquisición de datos es una NIDAQ USB 6008 de 12 bits de resolución, que se muestra en la Figura 5.17.

Figura N° 5.17
Aspecto físico de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008

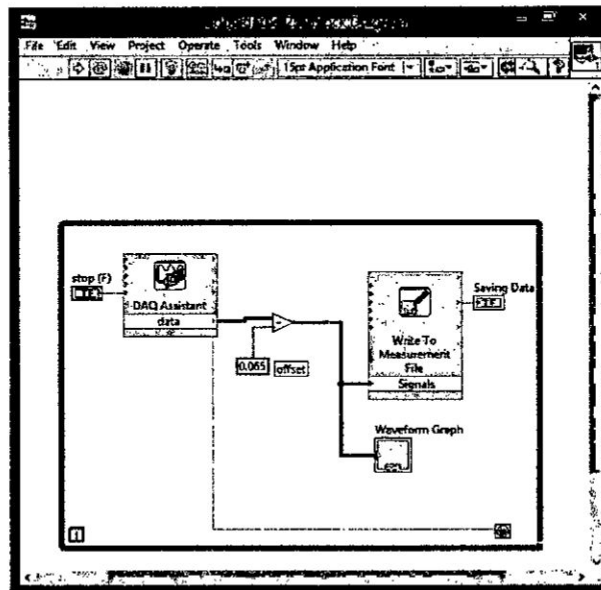


Fuente: Autoría propia

Los datos adquiridos luego del proceso de adquisición se guardaron en un archivo de datos en Excel, de denominación `data_motor.xlsx`, y el programa en LabVIEW tiene el nombre `adquidatos_2.lvm`. El programa en Matlab con el que se llama al

archivo de datos para el proceso de identificación es **identificación_gm.m**. El programa en LabVIEW se muestra en la Figura N° 5.18.

Figura N° 5.18
Programa en LabVIEW para la adquisición e
identificación del modelo del motor DC



Fuente: Autoría propia

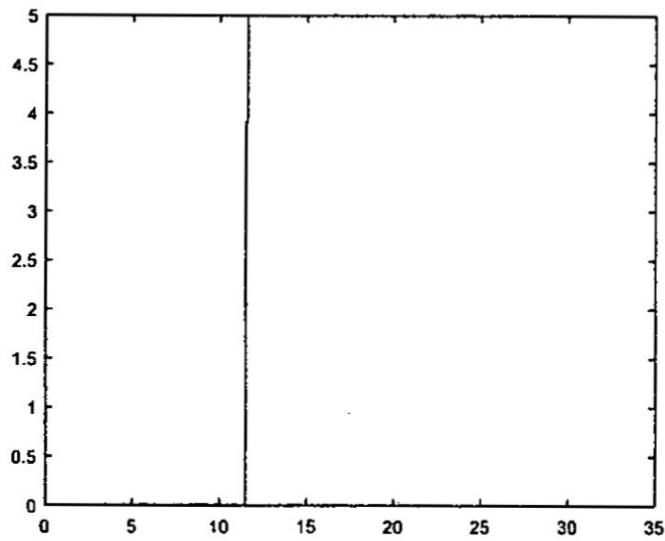
El programa de identificación denominado **identificación_gm.m** es el siguiente:

```
% IDENTIFICACION DEL MODELO DEL MOTOR DC GLOBE MOTORS
% IDENTIFICACIÓN NO PARAMÉTRICA Y PARAMÉTRICA
clc; close all; clear all
data=xlsread('data_motor.xlsx','Hoja1');
k=1:6459; % PARA PLOTEAR TODA LA DATA
T=0.005;
t=k*T;
y=data(:,2);
u=data(:,1);
plot(t,y,'b')
%hold on
%plot(t,u,'r')
ident
```

Def.

Al ejecutar el programa se obtiene la respuesta gráfica de la Figura N° 5.19 que viene a ser la gráfica de velocidad vs el tiempo.

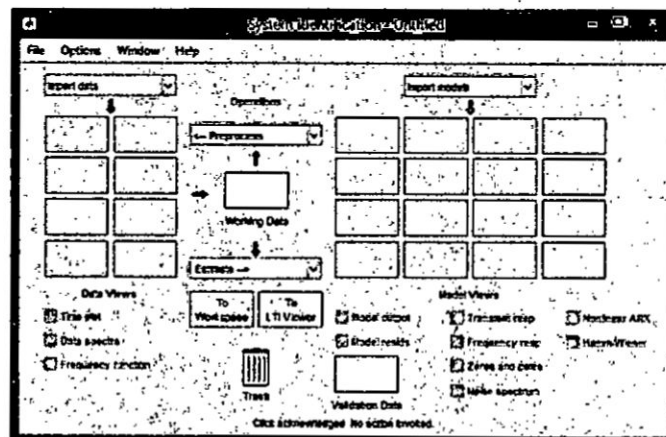
Figura N° 5.19
Gráfica de velocidad vs tiempo



Fuente: Autoría propia

Y a continuación llama al *ident* de Matlab, herramienta poderosa para el proceso de identificación. En consecuencia, aparecerá el pantallazo de la Figura N° 5.20.

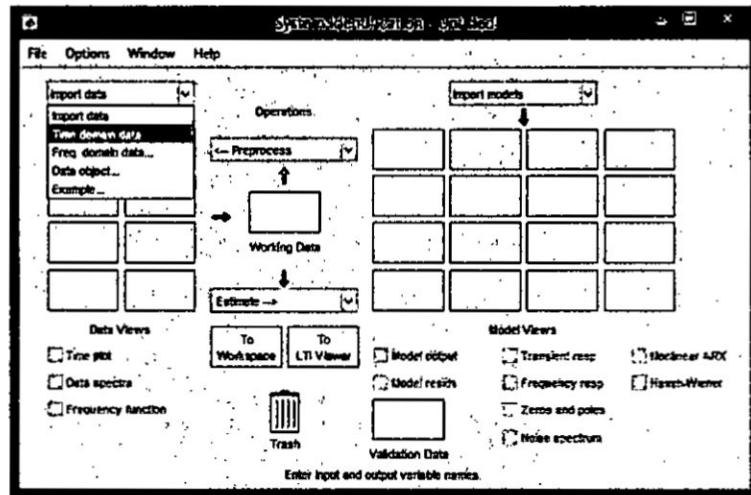
Figura N° 5.20
Ventana del Toolbox de identificación de Matlab



Fuente: Autoría propia

En la ventana superior izquierda se selecciona la opción Time domain data (Ver Figura N° 5.21).

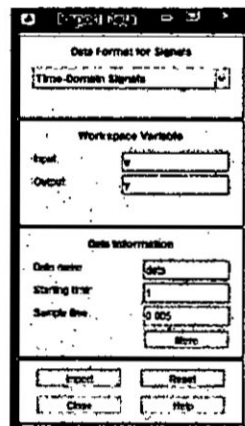
Figura N° 5.21
Selección de la opción Time domain data



Fuente: Autoría propia

Inmediatamente aparece otra ventana de configuración, denominada Import Data, en la cual se ingresan las variables de entrada y de salida, el nombre del archivo de datos y el período de muestreo entre otros, según se puede apreciar en la Figura N° 5.22.

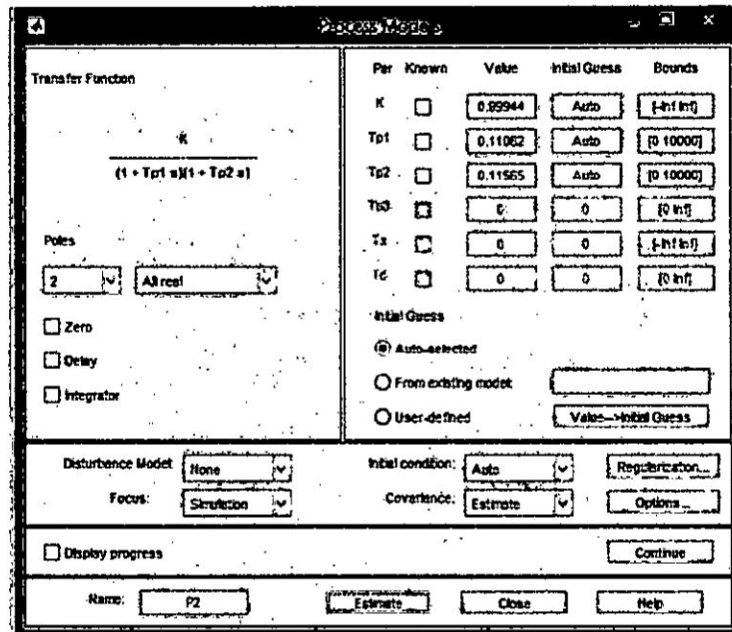
Figura N° 5.22
Ventana de configuración e importación de los datos



Fuente: Autoría propia

Se seleccionan polos y ceros y se hace click en **Estimate**, produciéndose la generación de la ganancia y los tiempos de respuesta del modelo del motor DC, como se muestra en la Figura N° 5.25.

Figura N° 5.25
Resultados de la ejecución, en el que se aprecian
los parámetros del modelo del motor DC.



Fuente: Autoría propia

La función de transferencia del motor DC viene a ser:

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{(s + 9.04)(s + 8.647)}$$

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{s^2 + 17.687s + 78.1689}$$

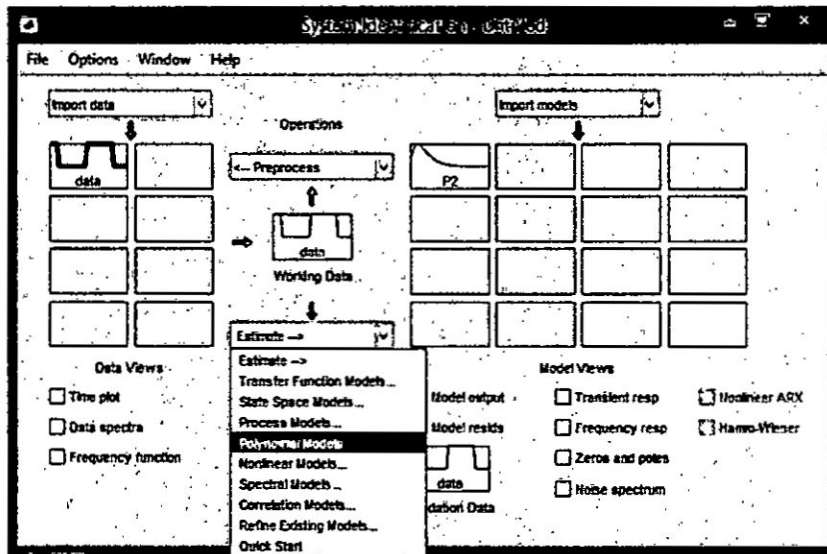
(5.23) *Aut*

5.3.2 Identificación Paramétrica del motor DC con encoder óptico

En esta sección se aborda la identificación paramétrica del motor DC en el dominio discreto, considerando varias estructuras paramétricas, como el ARX, ARMAX entre otros; para luego escoger la mejor estructura y orden que representa al motor DC.

En la Figura N° 5.26 se muestra la ventana **System Identification**, y en ella se selecciona la opción **Polynomial Models**, correspondiente al modelo paramétrico.

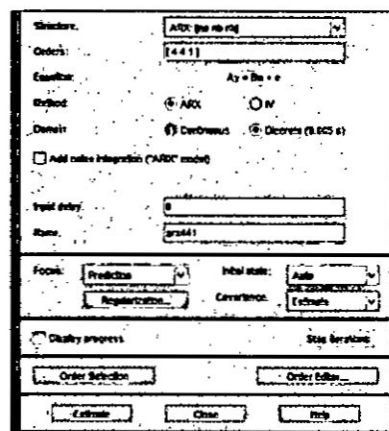
Figura N° 5.26
Selección del modelo polinomial (paramétrico).



Fuente: Autoría propia

Lo que genera la aparición de la ventana **Polynomial Models**, en el que se selecciona la estructura y el orden del sistema paramétrico (arx, armax, etc.), tal como se puede apreciar en la Figura N° 5.27.

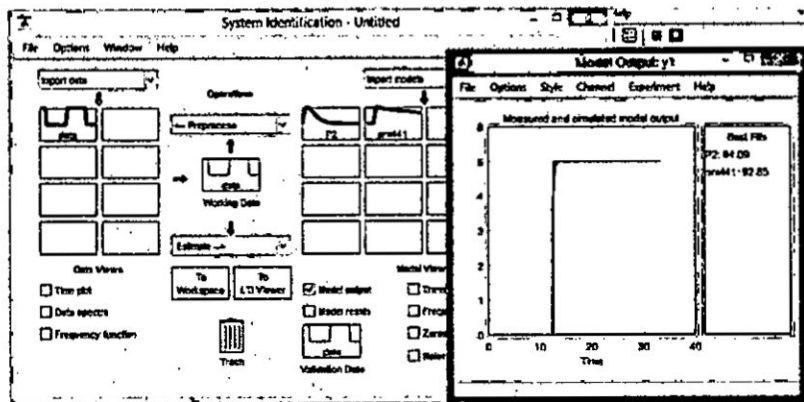
Figura N° 5.27
Configuración de la estructura ARX



Fuente: Autoría propia

Se da click en **Estimate**, apareciendo la respuesta gráfica arx (color verde) superpuesta a la respuesta de función de transferencia (P2). Se puede apreciar que la estructura ARX presenta menor exactitud que la anterior (ver Figura N° 5.28).

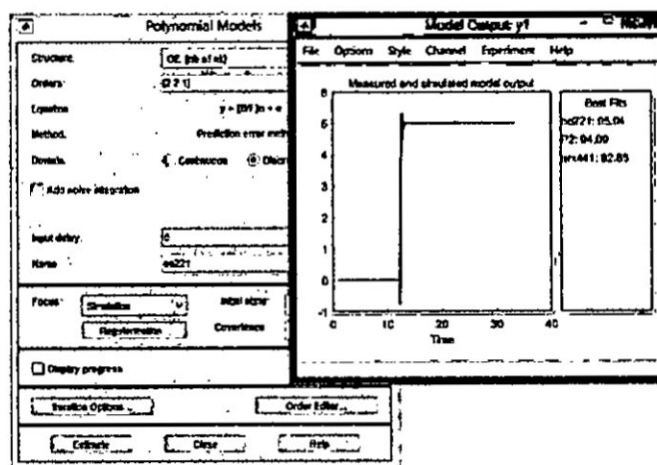
Figura N° 5.28
Respuesta de la estructura ARX (color verde)



Fuente: Autoría propia

Enseguida seleccionamos la estructura OE, la cual presenta una exactitud mayor (95.94 %), tal como se puede apreciar en la Figura N° 5.29.

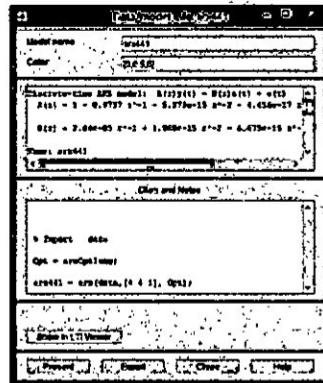
Figura N° 5.29
Respuesta de la estructura OE



Fuente: Autoría propia

La estructura polinomial del ARX se puede visualizar en la parte superior de la Figura N° 5.30.

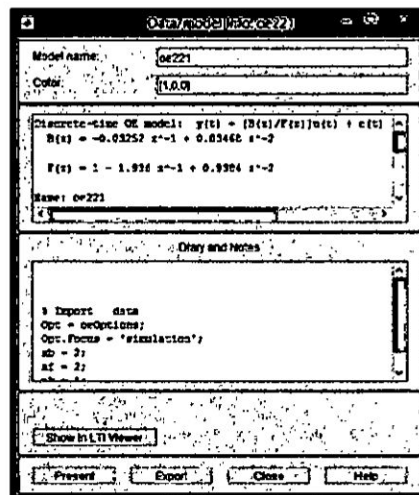
Figura N° 5.30
Estructura polinomial en tiempo discreto del ARX



Fuente: Autoría propia

Idénticamente, la estructura polinomial OE tendrá la respuesta mostrada en la Figura N° 5.31.

Figura N° 5.31
Estructura polinomial en tiempo discreto del OE



Fuente: Autoría propia

Por lo tanto, el modelo en tiempo discreto viene dada por la ecuación en diferencias dada por:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t) + e(t) \quad (5.24)$$

Siendo:

$$B(z) = -0.03252 z^{-1} + 0.03468 z^{-2}$$

$$F(z) = 1 - 1.936 z^{-1} + 0.9384 z^{-2}$$

Siendo el orden de los polinomios:

$$n_b = 2; \quad n_f = 2; \quad n_k = 1$$

5.4 Diseño del Sistema de Control PID de velocidad del motor DC

5.4.1 Introducción

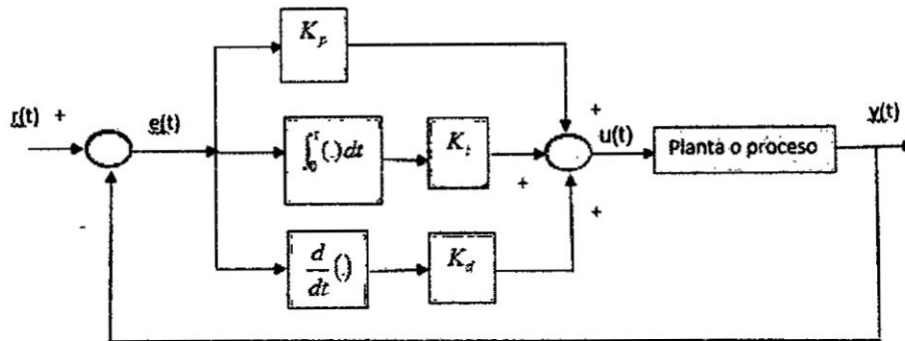
El control Proporcional Integral Derivativo (PID), es uno de los controladores clásicos más populares utilizados en el campo académico y en la industria. Inicialmente fue diseñado para atender el diseño de sistemas sencillos, particularmente univariados, denominados sistemas de simple entrada y simple salida (Single Input, Single Output: SISO), que no contemplaba variaciones de las condiciones de funcionamiento del proceso o planta; sin embargo, el avance tecnológico y la demanda por una mayor producción, de mejor calidad del producto, producción en menor tiempo, etc., hizo que se diseñaran máquinas y herramientas que permitieran el control de sistemas más complejos, multivariados, es decir sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple Input, Multiple Output: MIMO), y con dinámicas acopladas. En estas condiciones, las potencialidades del Control PID convencional no podían resolver el control de sistemas MIMO; por lo que se resolvió considerando condiciones de desacoplamiento del modelo del proceso, que permitieron el diseño de controladores PID MIMO de estructura desacoplada. Posteriormente aparecieron mejoras, tales como el Control PID Autosintonizado y Control PID Adaptivo, entre otros.

Jw.

5.4.2 Diseño del Controlador PID

En este trabajo, trataremos del diseño del Control PID clásico en tiempo continuo, cuyo diagrama de bloques puede apreciarse en la Figura 5.32.

Figura N° 5.32
Diagrama de bloques del Control PID acoplada a la planta



Fuente: Autoría propia

El algoritmo de control PID [12] se obtiene del diagrama de bloques de la Figura N° 5.32

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5.25)$$

Siendo:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}; \quad K_d = K_p T_d$$

La función de transferencia del controlador PID en tiempo continuo viene dada por:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p (T_d s^2 + s + 1/T_i)}{s} \quad (5.26)$$

Por consiguiente, la función de transferencia directa viene expresada por:

$$G(s) = G_p(s) G_c(s) = \frac{78.123 K_p (T_d s^2 + s + 1/T_i)}{s(s^2 + 17.687s + 78.1689)} \quad (5.27)$$

Por lo que, la función de transferencia de lazo cerrado es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{78.123K_p(T_d s^2 + s + 1/T_i)}{s^3 + (17.687 + 78.123K_p T_d)s^2 + (78.1689 + 78.123K_p)s + 78.123K_p/T_i} \quad (5.28)$$

En tal sentido, la ecuación característica de lazo cerrado es:

$$s^3 + (17.687 + 78.123K_p T_d)s^2 + (78.1689 + 78.123K_p)s + 78.123K_p/T_i = 0 \quad (5.29)$$

Para determinar los parámetros del Controlador PID, consideraremos las siguientes especificaciones de funcionamiento de lazo cerrado:

$$t_s = 1 \text{ Seg}; \quad \zeta = 0.8$$

Por lo que considerando el criterio de error del 2%, obtendremos:

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} = 1 \quad \Rightarrow \quad \zeta \omega_n = 4; \quad \omega_n = 5 \text{ rad/seg}$$

Para que la respuesta del sistema en lazo cerrado se aproxime a la respuesta de un sistema de segundo orden, elegimos el tercer polo ubicado a 5 veces la parte real de los polos dominantes, por lo que $p_3 = 5(\zeta \omega_n) = 20$. En consecuencia la ecuación característica deseada de lazo cerrado, viene representada por:

$$\begin{aligned} (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + p_3) &= 0 \\ (s^2 + 8s + 25)(s + 20) &= 0 \\ s^3 + 28s^2 + 185s + 500 &= 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Igualando las ecuaciones (5.29) y (5.30), obtenemos los parámetros del Controlador PID, así:

$$78.1689 + 78.123K_p = 185 \quad \Rightarrow \quad K_p = 1.3674$$

$$17.6875 + 78.123K_p T_d = 185 \quad \Rightarrow \quad T_d = 0.0965 \text{ Seg.}$$

$$78.123 \frac{K_p}{T_i} = 500 \quad \Rightarrow \quad T_i = 0.2136 \text{ Seg.}$$

Los parámetros del Controlador PID obtenidos en esta sección, nos servirá para efectuar la simulación de la respuesta del sistema en lazo cerrado, que se verá en el Capítulo VI.

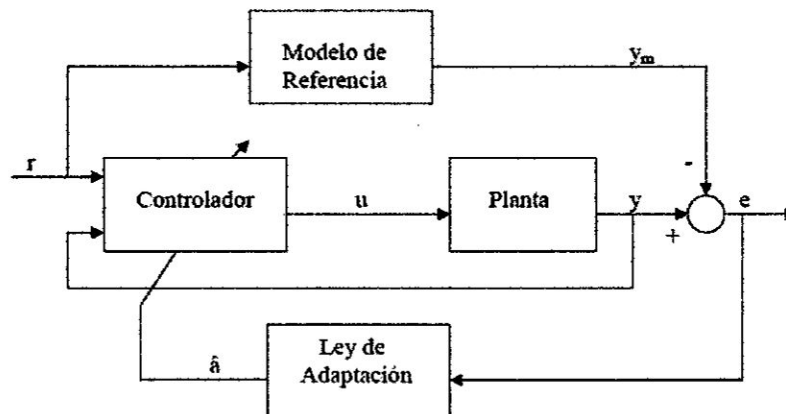
5.5 Diseño del Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)

5.5.1 Introducción

En este tipo de control adaptivo se parte de un comportamiento ideal del sistema, definido por un modelo de referencia. La diferencia instantánea entre el comportamiento real " y " y el modelo deseado " y_m " se utiliza para calcular los parámetros del controlador utilizado [2].

La figura 5.33 representa el funcionamiento de un sistema de control adaptivo con modelo de referencia.

Figura N° 5.33
Sistema de Control Adaptivo por Modelo de Referencia



Fuente: Astrom K. [2]

Para el diseño del Controlador Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC), se deben considerar lo siguiente:

- ✓ Se asume que la planta tiene una estructura conocida, aunque los parámetros son desconocidos. Para plantas lineales, se asume que el número de polos y ceros son conocidos; pero la localización de esos polos y ceros no lo son. Para plantas no lineales, esto implica que la estructura dinámica de la ecuación es conocida, pero que varios parámetros no lo son.
- ✓ El modelo de referencia es usado para especificar la respuesta ideal del sistema de control Adaptivo a una orden externa.

- ✓ El controlador es usualmente parametrizado por un número de parámetros ajustables (implica que se pueden obtener una familia de controladores por asignación de diferentes valores de parámetros ajustables). El controlador puede tener capacidad de seguimiento perfecto en orden a toda posibilidad de seguimiento convergente.

5.5.2 Determinación del Modelo de Referencia

El Modelo de Referencia como función de transferencia viene dada por:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.31)$$

Para determinar los parámetros del Modelo de Referencia dada por la ecuación (5.31), necesitamos especificar el comportamiento del sistema de control en lazo cerrado, para lo cual consideraremos:

$$t_s = 1 \text{ Seg}; \quad MP = 0.01$$

Determinemos el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural.

$$MP = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} = 0.01 \quad \Rightarrow \quad \text{operando:} \quad \zeta = 0.8261$$

$$t_s = 1 = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad \Rightarrow \quad \omega_n = \frac{4}{0.8261} = 4.8421$$

En consecuencia, el Modelo de Referencia viene expresada por:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{23.45}{s^2 + 8s + 23.45} \quad (5.32)$$

5.5.3 Determinación de la Ley de Control

De la ecuación (5.23) se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$y_p(t) + 17.687y_p(t) + 78.1689y_p(t) = 78.123u(t) \quad (5.33)$$

Idénticamente, de la ecuación (5.32), se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$y_m(t) + 8y_m(t) + 23.45y_m(t) = 23.45r(t) \quad (5.34)$$

Como debemos obtener error estacionario nulo, es decir:

$$e = y_p - y_m = 0 \Rightarrow y_p = y_m$$

Entonces, igualando (5.33) con (5.34):

$$-17.687y_p(t) - 78.1689y_p(t) + 78.123u(t) = -8y_m(t) - 23.45y_m(t) + 23.45r(t)$$

Despejando la señal de control "u(t)", obtenemos:

$$u(t) = 0.2264y_p(t) + y_p(t) - 0.1024y_m(t) - 0.3002y_m(t) + 0.3002r(t)$$

Como $y_p = y_m$; $y_p = y_m$, entonces la ley de control adaptiva viene dada por:

$$u(t) = 0.124y_p(t) + 0.7y_p(t) + 0.3002r(t) \quad (5.35)$$

Que es de la forma:

$$u(t) = q_0 y_p(t) + q_1 y_p(t) + f r(t) \quad (5.36)$$

Por lo que: $q_0 = 0.124$; $q_1 = 0.7$; $f = 0.3002$

5.6 Implementación del hardware utilizado para el control de velocidad

A continuación se lista el hardware utilizado:

1. Tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6008 (ver Figura N° 5.34)

Figura N° 5.34

Tarjeta DAQ USB 6008

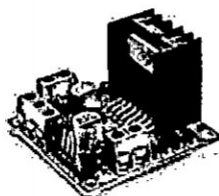


Fuente: Autoría propia

2. Módulo L298N (Driver de potencia)

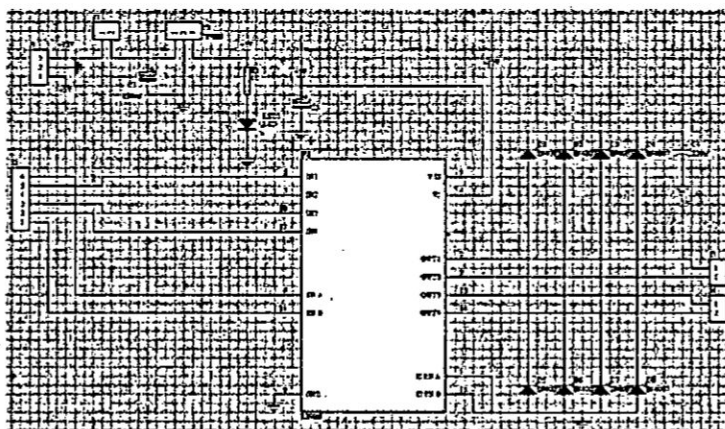
En la Figura N° 5.35 se puede apreciar la tarjeta del módulo de potencia L298N y en la Figura N° 5.36 se visualiza el esquema del mismo.

Figura N° 5.35
Módulo L298 (driver de potencia)



Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.36
Esquema del módulo L298 (Driver de potencia)



Fuente: Autoría propia

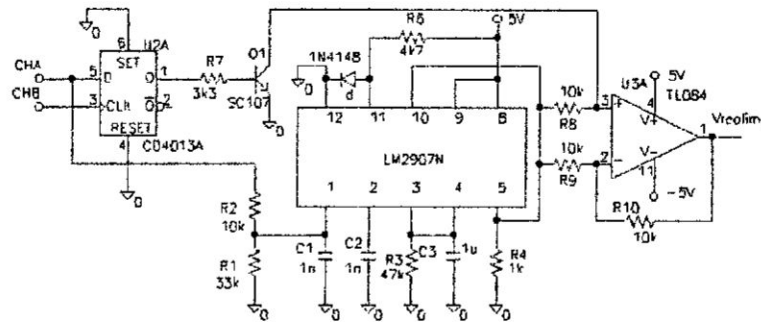


3. C.I. Conversor de frecuencia a voltaje (Circuito sensor de velocidad)

El circuito de la Figura N° 5.37 está basado en el CI LM2907N. A partir de uno de los canales del encoder (por ejemplo el CHA) se obtiene la velocidad absoluta a la que gira el motor, por medio de un circuito

adicional (decodificador de cuadratura: CD4013A). La salida del circuito sensor se obtiene por medio del TL084.

Figura N° 5.37
Circuito sensor de velocidad



Fuente: Autoría propia

4. Conversor voltaje/PWM SG63524

En la Figura N° 5.38 se puede apreciar el circuito integrado SG63524, que viene a ser un generador PWM, bastante útil para convertir la tensión proveniente de la tarjeta USB 6008 (señal de control) en señal modulada en ancho de pulso, y así no ser afectada por el ruido. Las salidas del PWM se conectan al driver de potencia L298.

Figura N° 5.38
Chip SG63525 (Generador PWM)



Fuente: Microsemi

5. Motor DC con encoder óptico acoplado su eje.

En la Figura N° 5.39 se observa el motor DC con encoder óptico, de la marca Globe Motors.

Figura N° 5.39
Motor DC Globe Motors con encoder óptico acoplado



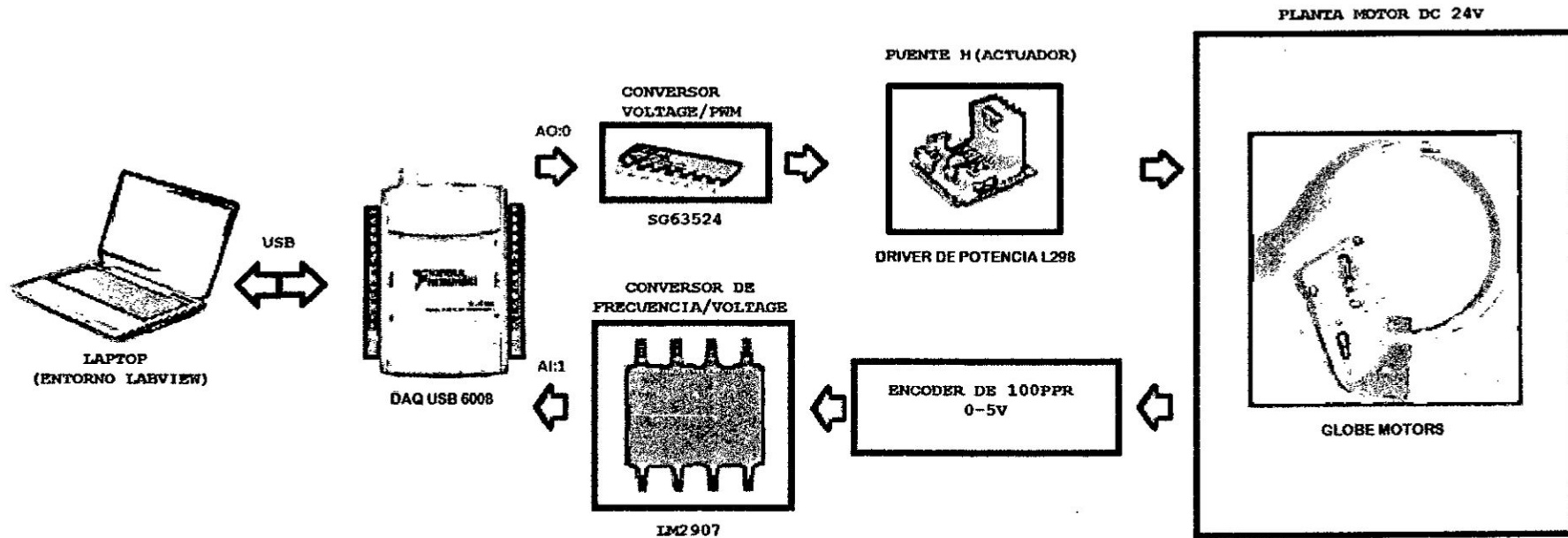
Fuente: Autoría propia

En la Figura N° 5.40 se puede apreciar el diagrama de bloques de la implementación del circuito de control de velocidad del motor DC, en la cual se pueden observar los componentes indicados líneas arriba.

Aut

Figura N° 5.40

Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware para el control de velocidad del motor DC.



Fuente: Autoría propia

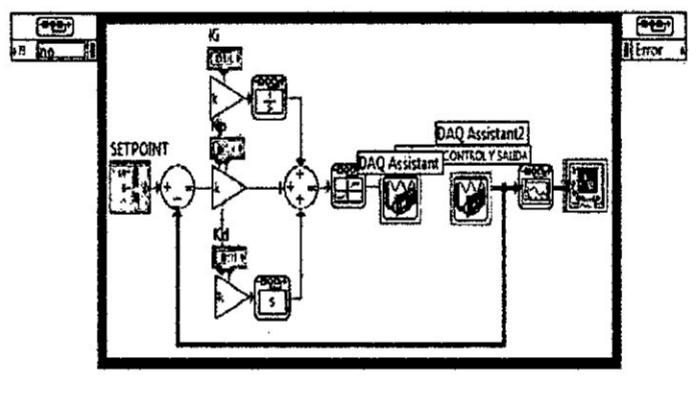
Aut

5.7 Implementación del Control Proporcional Integral Derivativo (PID) a nivel de software

La implementación del programa en tiempo real, se ha realizado en código gráfico, utilizando para ello LABVIEW [9]. La programación gráfica se muestra en la Figura 5.41, y el panel frontal o panel del usuario se muestra en la Figura N° 5.42.

Figura N° 5.41

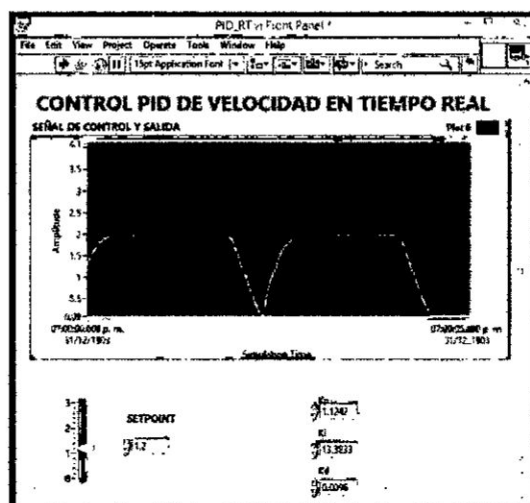
Diagrama de bloques de la implementación a nivel de hardware del Control PID de velocidad del motor DC



Fuente: Autoría propia

Figura N° 5.42

Gráfica del Control de velocidad PID del motor DC



Fuente: Autoría propia

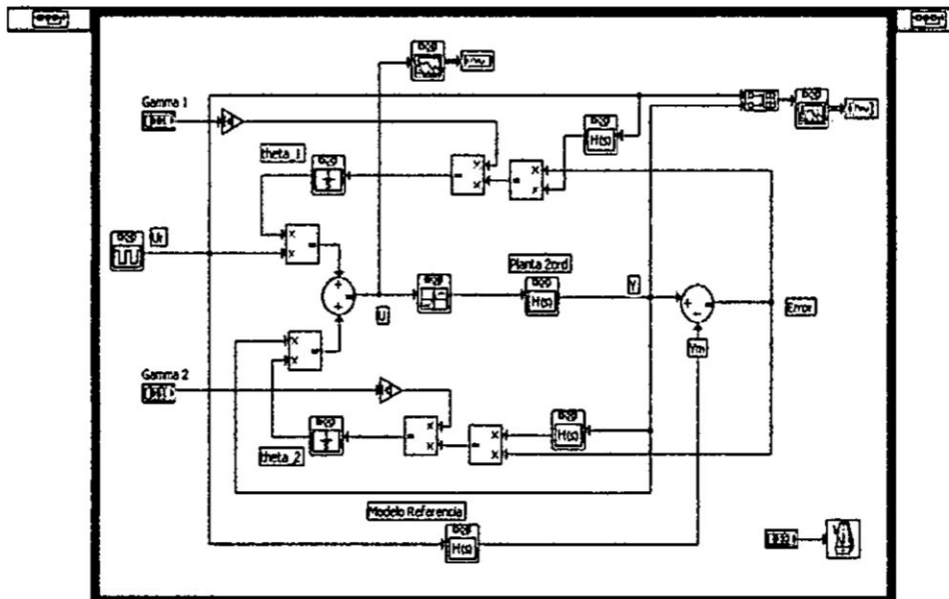
Handwritten signature

En el Capítulo VI se presentan los resultados del Control PID en tiempo real, de la señal controlada vs señal de referencia, usando LabVIEW.

5.8 Implementación del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de software

La implementación a nivel de software del MRAC (Panel Frontal), siguiendo las consideraciones de diseño establecidas en la sección 5.5, se muestra en la Figura N° 5.43 (Block Diagram), y el resultado gráfico se muestra en la sección 6.7.

Figura N° 5.43
Diagrama de bloques en LabVIEW



Fuente: Autoría propia

Handwritten signature

VI RESULTADOS

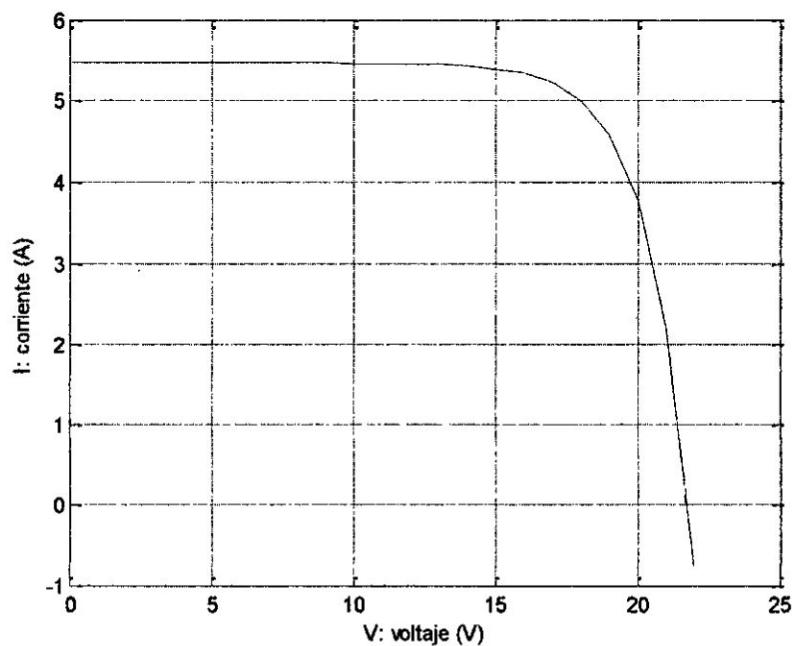
6.1 Resultados del modelado del panel solar

Reemplazando valores correspondientes al panel solar SFM 90W, en la ecuación 5.13 (capítulo V, subsección 5.1), se obtiene:

$$b = \frac{\frac{18.1}{21.8} - 1}{\text{Ln}\left[1 - \frac{4.98}{5.47}\right]} = 0.0703 \quad (6.1)$$

Si reemplazamos este valor en las ecuaciones 5.6 y 5.7, se obtienen las ecuaciones específicas de corriente y voltaje que permiten obtener las curvas V-I del panel solar, tal como se muestra en la Figura N° 6.1, y considerando la ecuación 5.8 se obtiene la Figura N° 6.2.

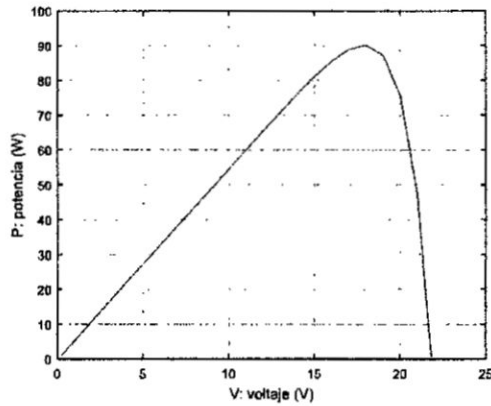
Figura N° 6.1
Respuesta V-I del panel fotovoltaico



Fuente: Autoría propia

Handwritten signature

Figura N° 6.2
Respuesta P-V del panel fotovoltaico

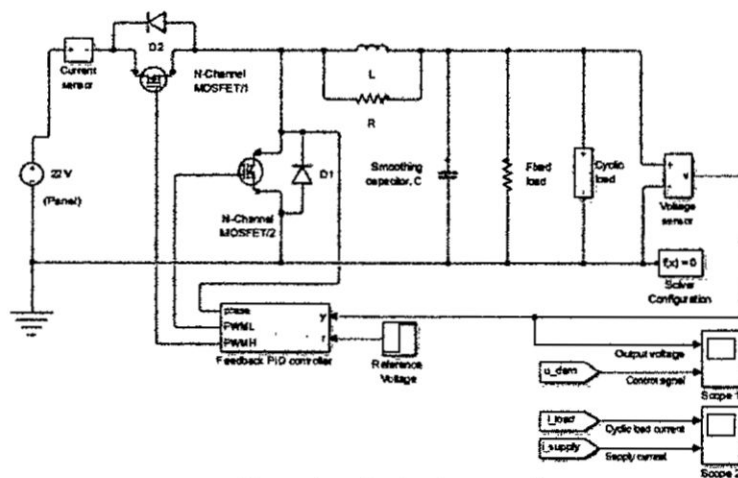


Fuente: Autoría propia

6.2 Resultados de la implementación del sistema de alimentación con Panel Solar

La alimentación del motor DC se realiza por medio del regulador de carga, compuesto por el convertidor Buck, por lo que, la implementación del control PID del convertidor Buck en la plataforma Simulink [11], [1], se puede observar en la Figura N° 6.3, considerando una tensión de entrada de 22 V y un voltaje de referencia que va de 5 V a 12 V. El resultado, es una salida adecuada, tal como se muestra en la Figura N° 6.4.

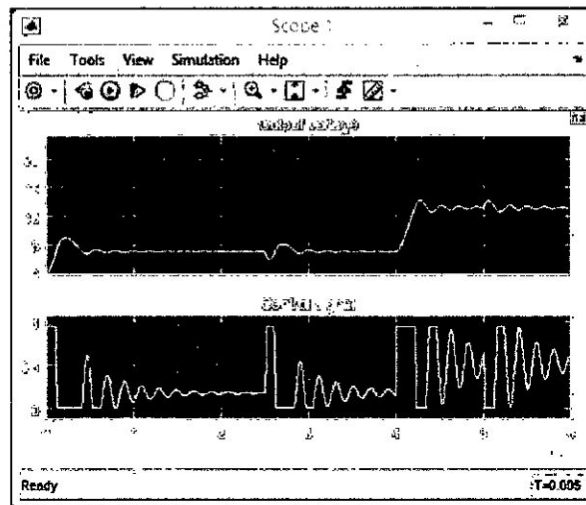
Figura N° 6.3
Esquema de Control PID del Convertidor Buck en Simulink



Fuente: Autoría propia

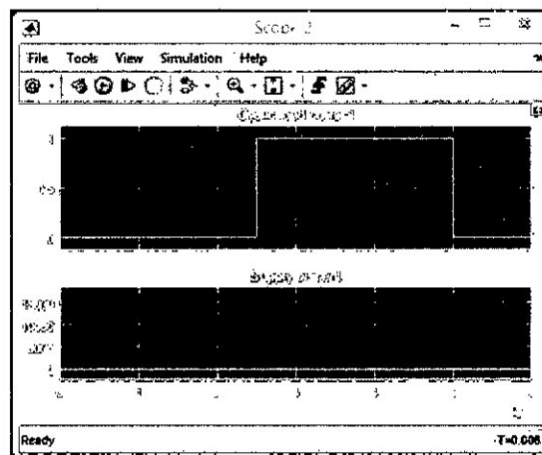
Asimismo en la Figura N° 6.5 se puede observar la corriente del ciclo de carga.

Figura N° 6.4
Voltaje de salida del convertidor Buck en
Simulink



Fuente: Autoría propia

Figura N° 6.5
Corriente del ciclo de carga del convertidor Buck en
Simulink

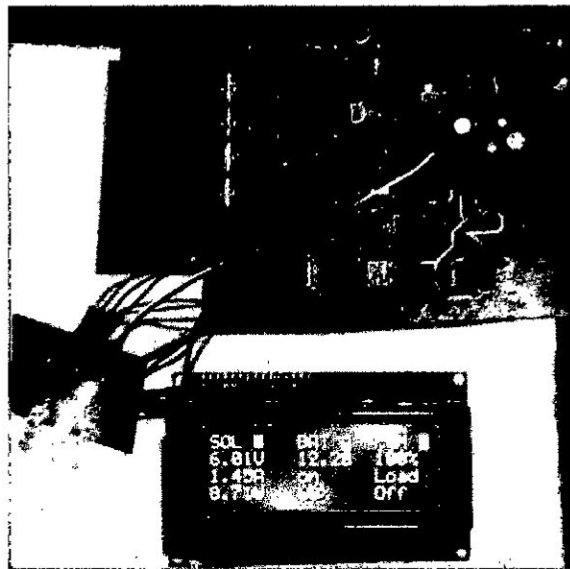


Fuente: Autoría propia

Handwritten signature

Asimismo, los resultados en tiempo real, usando una tarjeta reguladora de carga (convertidor Buck) y la plataforma ARDUINO, puede observarse en la Figura N° 6.6, en el que podemos observar la lectura del display LCD del controlador de carga (convertidor Buck).

Figura N° 6.6
Lectura del convertidor DC/DC Buck



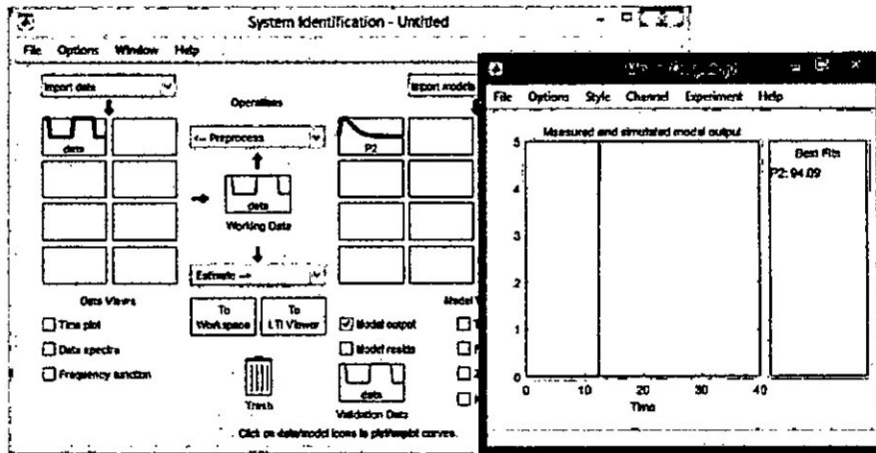
Fuente: Benites N. [3]

6.3 Resultados de la identificación del modelo del motor DC

Como se puede observar de la Figura 5.19 (capítulo V, sección 5.2), la ganancia es $K = 0.99944$, y los tiempos de respuesta son: $T_{p1} = 0.11062$ seg., $T_{p2} = 0.11565$ seg. Luego en la ventana de identificación de sistemas (System Identification) se hace click en Model Output, y se obtiene la respuesta gráfica mostrada en la Figura N° 6.7.

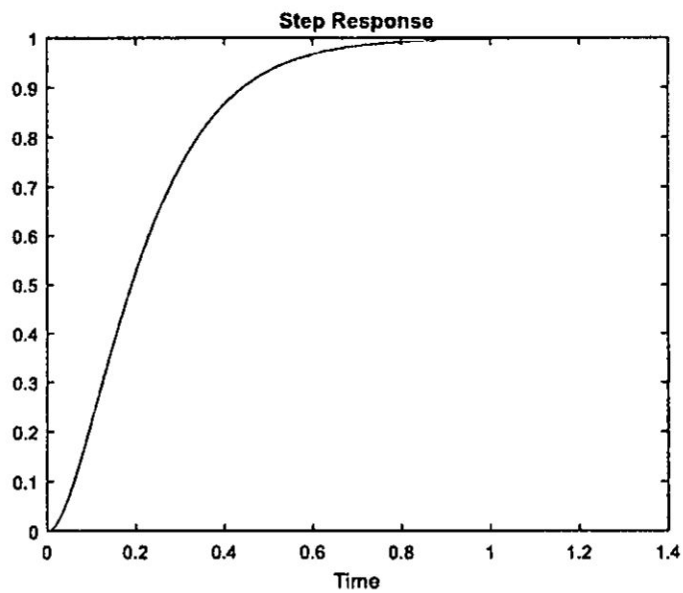
Se puede apreciar que el proceso de identificación arroja un 94.09 % de exactitud. Asimismo, en la Figura N° 6.8 se muestra la respuesta al escalón del modelo de función de transferencia obtenido.

Figura N° 6.7
Resultado gráfico del proceso de identificación.



Fuente: Autoría propia

Figura N° 6.8
Respuesta del modelo a una entrada escalón unitario.



Fuente: Autoría propia

Comparación con el modelo teórico y determinación de los parámetros del motor DC

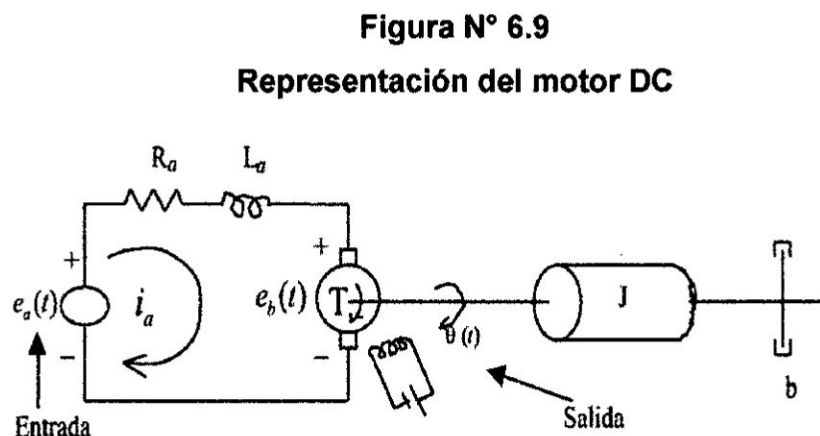
A continuación, se pasa al proceso de comparación del modelo de función de transferencia obtenido por identificación con el método teórico, para así obtener los parámetros específicos del motor DC.

Recordemos que el modelo de función de transferencia del motor DC por el proceso de identificación es:

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{(s + 9.04)(s + 8.647)}$$
$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{78.123}{s^2 + 17.687s + 78.1689} \quad (6.2)$$

Ahora, obtengamos el modelo teórico del motor DC.

En la Figura 6.9 se observa la representación del motor DC, teniendo como entrada de excitación la tensión de armadura, y manteniendo constante la tensión y la corriente en el circuito de campo.



Fuente: Autoría propia

Las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del motor DC se pueden circunscribir a las siguientes partes:

1. Circuito Eléctrico

El circuito eléctrico del motor viene representada por la ecuación de Kirchoff, así:

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (6.3)$$

2. Conversión de energía Eléctrica en Mecánica

El torque T desarrollado por el motor es proporcional al producto de la corriente de armadura $i_a(t)$ y al flujo φ en el entrehierro, el que a su vez es proporcional a la corriente de campo, donde:

$$\begin{aligned} \varphi &= K_f i_f = cte. \\ \dot{T}(t) &= \varphi K_a i_a ; \text{ por lo que:} \\ T(t) &= K_f i_f K_a i_a \\ T(t) &= K i_a \end{aligned} \quad (6.4)$$

Siendo:

K_f : Constante de campo

K_a : Constante de armadura

$K = K_f i_f K_a = cte.$

e_a : Tensión de armadura

e_f : Tensión de campo

i_a : Corriente de armadura

i_f : Corriente de campo

R_a : Resistencia de armadura

L_a : Inductancia de armadura

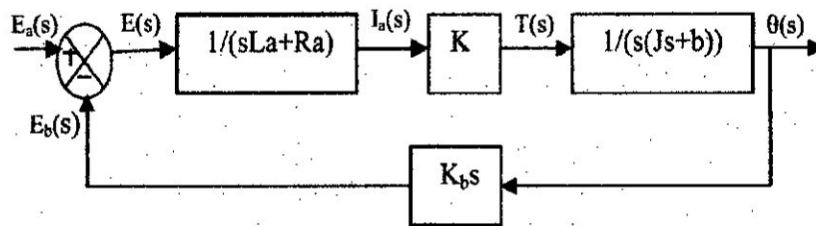
3. Circuito Mecánico

Aplicando la segunda ley de Newton para el movimiento rotacional se obtiene:

$$T(t) = J \frac{d^2\theta}{dt} + b \frac{d\theta}{dt} \quad (6.5)$$

Figura N° 6.10

Diagrama de bloques representativo del modelo de función de transferencia del motor DC



Fuente: Autoría propia

La función de transferencia del motor DC considerando como salida la posición angular es:

$$G_p(s) = \frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{JL_a s^3 + (L_a b + R_a J)s^2 + (R_a b + K_b K)s} \quad (6.13)$$

Como nuestro modelo considera que la salida es la velocidad angular, entonces la función de transferencia es:

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K / JL_a}{s^2 + [(L_a b + R_a J) / JL_a]s + [(R_a b + K_b K) / JL_a]} \quad (6.14)$$

Igualando las ecuaciones 6.2 y 6.14, se obtiene:

$$\frac{K}{JL_a} = 78.123; \quad \frac{R_a b + K_b K}{JL_a} = 78.1689; \quad \frac{L_a b + R_a J}{JL_a} = 17.1689$$

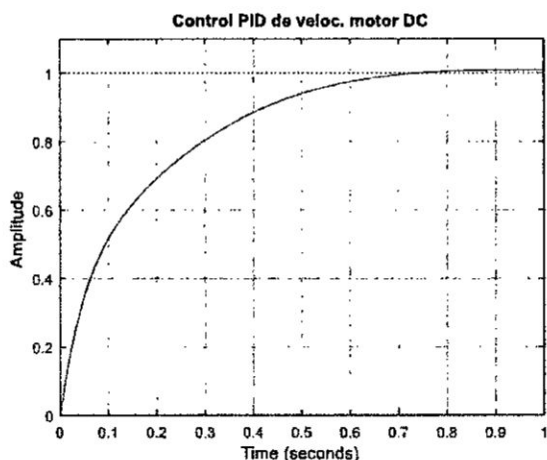
Considerando las mediciones de voltaje en los extremos del motor, el cálculo de la resistencia de armadura a plena carga, y despejando los parámetros, se encuentran que:

$$K \approx 1; \quad R_a = 1.67\Omega; \quad K_b = 0.02V / rad / s; \quad b = 0.9Nm / rad / s; \\ J = 1.2 \times 10^{-2} Nms^2$$

6.4 Resultados de la simulación del Control PID de velocidad del motor DC

La función de transferencia, del controlador PID viene dada por la ecuación (5.18). Reemplazando valores de los parámetros del Controlador PID obtenidos analíticamente, nos sirve para efectuar la simulación de la respuesta del sistema en lazo cerrado. Al ejecutar el programa *PIDmotor.m* se obtiene la respuesta gráfica mostrada en la Figura 6.11.

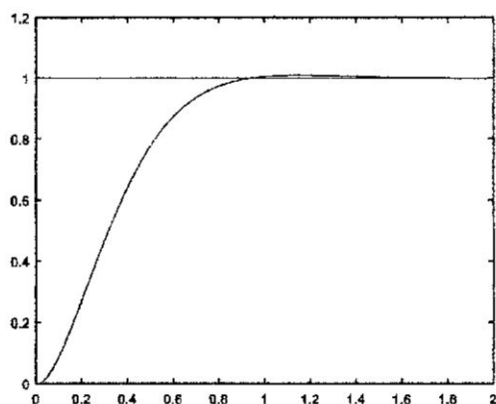
Figura N° 6.11
Respuesta del Sistema de Control PID frente
a una entrada escalón unitario



Fuente: Autoría propia

6.5 Resultados de la simulación del Control MRAC de velocidad del motor DC
Al ejecutar el programa *vel_mracs_motor.m*, obtenemos la respuesta gráfica del MRAC, tal como se puede apreciar en la Figura N° 6.12.

Figura N° 6.12
Respuesta del Sistema del MRAC frente a
una entrada escalón unitario



Fuente: Autoría propia

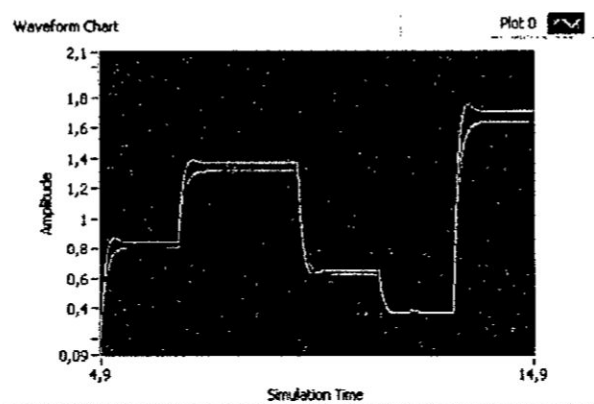
Aut

6.6 Resultados del Control PID de velocidad del motor DC en tiempo real

En la Figura N° 6.13 se presenta las gráficas comparativas de las señales de Referencia (Setpoint: rojo) y la velocidad controlada (salida: amarillo).

Figura N° 6.13

Salida controlada (velocidad del motor: amarillo)
vs setpoint (velocidad de referencia: rojo)



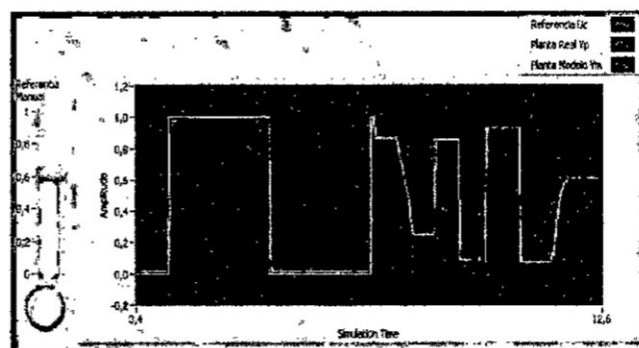
Fuente: Autoría propia

6.7 Resultados del MRAC de velocidad del motor DC en tiempo real

Los resultados del Control MRAC en tiempo real, se muestran en la Figura N° 6.14, y en él se puede visualizar dos gráficas superpuestas, la salida controlada y la referencia.

Figura N° 6.14

Salida controlada (velocidad del motor: rojo) vs
setpoint (velocidad de referencia: amarillo)



Fuente: Autoría propia

Los parámetros del MRAC obtenidos al obtener la ley de control, con los que conseguimos adaptación rápida y respuesta muy cercana a la buscada, son:

$$q_0 = 0.124; \quad q_1 = 0.7; \quad f = 0.3002$$



VII. DISCUSIÓN

7.1 Comparación de resultados

En la tabla 7.1 se presenta un resumen de los resultados de simulación, aplicando las dos estrategias de control tratado, y en la Tabla N° 7.2 se presenta un resumen de los resultados de las dos estrategias de control en tiempo real.

Tabla N° 7.1
Resumen de resultados de simulación de las dos técnicas de control

Estrategia	t_s (Seg.)	Sobrepico (%) de las salidas controladas
Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	0.9	Velocidad del motor DC (1%)
Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)	1.5	Velocidad del motor DC (0%)

Fuente: Autoría propia.

De los resultados de simulación mostrados en las secciones 6.3 y 6.4 y presentados en la Tabla 7.1, se puede observar que la técnica de Control PID presenta ligeramente un tiempo de asentamiento de 0.9 segundos y un sobrepico pequeño de aproximadamente 1%; mientras que en el MRAC, el sobrepico es de 0 % y un tiempo de asentamiento de 1.5 segundos.

Tabla N° 7.2
Resumen de resultados de las dos técnicas de control en tiempo real

Estrategia	t_s (Seg.)	Error estacionario
Control Proporcional Integral Derivativo (PID)	2.0	0.1
Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC)	0.4	0.0

Fuente: Autoría propia.

De la Tabla N° 7.2, podemos observar que el tiempo de asentamiento y error estacionario son menores en el Control Adaptivo por Modelo de Referencia.

7.2 Conclusiones y recomendaciones

De lo indicado en la sección 7.1, podemos concluir que, considerando que la variable de interés es la velocidad del motor DC, se puede decir que, la técnica de Control por Modelo de Referencia (MRAC) a nivel de simulación presenta ligeramente una mejor respuesta, debido a que presenta perfecto seguimiento (0 % de sobrepico), aunque el tiempo de asentamiento es ligeramente mayor que el PID, que en realidad no es significativo, ya que el tiempo de asentamiento de aproximadamente 1.5


segundos es razonable en el control de velocidad del motor DC; por lo que en este caso, el MRAC sería el más apropiado.

Igualmente, en el caso de las respuestas en tiempo real para trayectorias variantes, se puede concluir que la técnica del Control Adaptivo por Modelo de Referencia (MRAC) es mejor que el PID, con un tiempo de asentamiento de 0.4 segundos y un error estacionario nulo.

Finalmente podemos sugerir que para trabajos futuros se utilicen otros algoritmos alternativos como Control Fuzzy y Control Neuronal.



VIII. REFERENCIALES

- [1] ARCE RUBIO, A., VIANNA RAFFO, G. **Manual Avanzado de Simulink para la asignatura Fundamentos de Automática.** Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, España. 2009.
- [2] ASTROM K., WITTENMARK B. **Adaptive Control.** Second Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1989.
- [3] BENITES SARAIVA, Nicanor. **Control de Potencia MPPT y SVPWM, aplicado a un Sistema Eólico-Solar Autónomo.** Universidad Nacional del Callao, Perú. 2017.
- [4] CAMPOS DANIEL, U. **Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD.** Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 9 (1-9). 2006.
- [5] CARDONA HERRERA, Sebastián., OSPINA HURTADO, Steven. **Construcción de Módulo Convertidor CC-CC Elevador, para Prácticas en el Laboratorio del Programa Ingeniería Mecatrónica Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.** 2015.
- [6] DÍAZ NARVAEZ, Heider y DIEZ CARDONA, Fabián. **Análisis, Modelado, Simulación y Validación de un Sistema de Generación de Energía Solar Autónomo. Caso: Universidad Autónoma de Occidente,** Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali. 2007.
- [7] ERICKSON Robert., MAKSIMOVIC Dragan. **Fundamentals of Power Electronics.** (second edition). New York, EE.UU: Kluwer Academic Publishers. 2004. 
- [8] LÓPEZ GUILLÉN, Maria E. **Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua.** Departamento de Electrónica, Universidad Nacional de la Plata, Argentina. 2003.

- [9] LAJARRA VIZCAÍNO, José., PELIGRÍ SEBATIÁ, José. **LabVIEW. Entorno gráfico de programación.** Alfaomega-marcombo, México-Barcelona. 2007.
- [10] MARTÍNEZ BUENO, Angel. **Identificación experimental de sistemas.** Universidad de Alicante, España. 2011.
- [11] MATHWORKS. **Simulink Getting Started Guide. Matlab & Simulink.** MathWorks, Inc. 2016.
- [12] OGATA, Katushiko. **Ingeniería de Control Moderna.** Tercera edición, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México, Nueva York. 1998.
- [13] TORRENTE ARTERO, Óscar. **ARDUINO. Curso práctico de formación.** Primera edición, Alfaomega, México. 2013.



IX. APÉNDICES

APÉNDICE A

Programa en Matlab de Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

(Autoría propia)

```
% CONTROL PID DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DC
% PIDmotor.m
clear all; close all; clc
num=78.123;
den=[1 17.687 78.1689];
Kp=1.3674;
Ki=6.4;
Kd=0.1319;
numc=[Kd, Kp, Ki];
denc=[1 0];
Gc=tf(numc,denc)

%lazo abierto
numa=conv(num,numc);
dena=conv(den,denc);
Ga=tf(numa,dena)

%lazo cerrado
[numac,denac]=cloop(numa,dena);
Gac=tf(numac,denac)
step(numac,denac);
title('Control PID de veloc. motor DC')
grid;
```

APÉNDICE B

Programa en Matlab de Control por Modelo de Referencia (MRAC)

(Autoría propia)

```
clear all; clc;
% vel_mrac_motor.m
% Simulación de Control de Velocidad MRAC del motor DC
% Modelado de Planta Real
numG=78.123;
denG=[1 17.687 78.1689];
G=tf(numG,denG)

% Calculo del Modelo de Referencia
mp=0.01;
ts=1;
ep=sqrt(log(mp)^2/(pi^2+log(mp)^2));
wn=4/(ts*ep);
numGm=[wn^2];
denGm=[1 2*ep*wn wn^2];
Gm=tf(numGm,denGm)

% Grafica
t=0:0.001:2;
r=[ones(1,ceil(length(t)/2)) ones(1,floor(length(t)/2))];
%yG=lsim(G,u,t);
yGm=lsim(Gm,r,t);
plot(t,r,'k',t,yGm,'r')
```

X. ANEXOS

Matriz de Consistencia

Título: "IDENTIFICACIÓN DEL MODELO Y CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DC ALIMENTADO MEDIANTE PANEL SOLAR"

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>General</p> <p>En muchas aplicaciones, el control de motores DC implica por un lado la exactitud en el control de velocidad o posición, y ello exige diseñar un controlador adecuado, y este a su vez necesita contar con un modelo muy cercano al comportamiento real. Determinar el modelo matemático mediante métodos analíticos, exige conocer sus parámetros, como la inercia, constante de torque, resistencia de armadura o de campo, etc.</p> <p>Otro de los problemas que se presenta en el control de motores o de cualquier otra aplicación, es que la energía que se consume proviene de energías fósiles, así como el incremento del costo, a lo que hay que sumarle el aumento de la contaminación ambiental, situación que estaría contraviniendo las recomendaciones de mitigar el efecto invernadero.</p>	<p>Objetivo general</p> <p>El objetivo general del presente trabajo es diseñar e implementar controladores de velocidad de un motor DC, alimentado mediante panel solar.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>Los objetivos específicos del presente trabajo son:</p> <p>b1. Modelar e implementar un sistema de alimentación con panel solar.</p> <p>b2. Identificar el modelo de un motor DC.</p> <p>b3. Diseñar e implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC y simular sus respuestas en lazo cerrado.</p> <p>b4. Implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC en tiempo real y analizar sus respuestas en lazo cerrado.</p>	<p>H.E.1: "El modelado e implementación de un sistema de alimentación mediante panel solar, permitirá contar con energía eléctrica regulada y procedente de una fuente no contaminante, necesaria para alimentar a un motor DC".</p> <p>H.E.2: "El proceso de identificación del modelo del motor DC, permitirá obtener una respuesta de velocidad muy cercana al comportamiento real del motor".</p> <p>H.E.3: "El diseño de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar a nivel de simulación la velocidad del modelo del motor DC en lazo cerrado.</p> <p>H.E.4: "La implementación de los controladores PID y Adaptivos, permitirá controlar la velocidad del motor DC en lazo cerrado y en tiempo real.</p>	<p>Variables dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Energía DC generada por el sistema de conversión DC/DC del sistema de energía solar fotovoltaica ◊ Velocidad del motor sin carga y con carga <p>Variables Independientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Energía solar fotovoltaica generada por el panel solar ◊ Señal de control generada por el controlador de velocidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelar e implementar el sistema de alimentación con panel solar • Identificar el modelo de un motor DC con encoder óptico • Diseñar e implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC y simular sus respuestas en lazo cerrado. • Implementar a nivel de software los algoritmos de control PID y Adaptivo de velocidad del motor DC en tiempo real y analizar sus resultados. • Efectuar las conclusiones y recomendaciones correspondientes.