

**Escuela Superior Politécnica del Litoral.**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y**

**Computación.**

Diseño de un sistema de control para el bombeo de  
agua potable a presión constante.

**Proyecto Integrador**

Previo a la obtención del título de:

**Ingeniero en Electrónica y Automatización.**

Presentado por:

Juan Carlos Solano Aguirre.

Manuel Enrique Morquecho Sánchez.

**Guayaquil – Ecuador**

**Año: 2020**

## **DEDICATORIA**

En memoria a todas las personas que fallecieron por la pandemia del COVID-19. Dedico esta tesis a mi maravillosa y querida familia, así como a las personas que padecen de insuficiencia renal crónica en todo el mundo.

***Juan Carlos Solano Aguirre***

El presente proyecto es dedicado a mi familia, sobre todo a mis padres Anamaría Sánchez y Manuel Morquecho; a mis tíos por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.

***Manuel Enrique Morquecho Sánchez***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por permitirme la salud y la vida que él me ha otorgado; a mi familia y a mis padres, Juan Carlos Solano Abril y Martha Janneth Aguirre Mosquera, mis amores incondicionales y primeros maestros; un agradecimiento especial a mi tía Bertha Priscila Solano Abril y familia, por permitirme una segunda oportunidad de vida. Finalmente, a mis amigos y maestros; en especial agradecimiento al Ing. Manuel Ruiz Berna

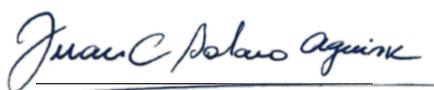
***Juan Carlos Solano Aguirre***

Agradezco a Dios, mis familiares, amigos, los Lords y en general a cada una de las personas que han sido parte de esta etapa de mi vida, el apoyo y las risas no faltaron; definitivamente no hubiera sido lo mismo sin cada uno de ustedes.

***Manuel Enrique Morquecho Sánchez***

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Juan Carlos Solano Aguirre* y *Manuel Enrique Morquecho Sánchez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Juan Carlos  
Solano Aguirre



Manuel Enrique  
Morquecho Sánchez

# EVALUADORES



---

**PhD. Wilton Edixon Agila Galvez**  
PROFESOR DE LA MATERIA



---

**MSc. Holguer Cevallos Ulloa**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En la industria moderna, la eficiencia en los procesos juega un rol fundamental en cada una de las etapas de la línea de producción, esto además de evitar pérdidas económicas, optimiza los tiempos de entrega y se puede entregar un producto de calidad al consumidor final. En algunos de estos procesos, el suministro de agua potable es muy importante y para ello es necesario mantener la presión constante, lo cual es en muchas de las ocasiones es trascendental en algunas etapas de producción. Lamentablemente, en muchos casos no existe una presión de bombeo constante y en el caso del agua potable, el cual es un recurso natural indispensable para la vida y limitado en ciertos sectores, el desperdicio de éste debe ser inaceptable; también puede ocurrir el caso contrario donde la presión no es suficiente para abastecer a los diversos servicios a los cuales se destina; ambos escenarios se pueden traducir en pérdidas económicas para una empresa y/o industria.

Al mantener una presión constante se garantiza a los usuarios un suministro de calidad, lo que también implica que a nivel de empresa se tengan menos pérdidas y una mayor eficiencia en procesos que requieran una alta precisión en la presión de un determinado fluido. Por los motivos mencionados, se propuso realizar la simulación de un diseño de sistema de control de presión automatizado utilizando como elementos principales un controlador, transductor de presión y un variador de frecuencia. El controlador utilizado fue un PID el cual pudo ser seteado de dos maneras, la primera a través de pruebas y estimaciones; la segunda utilizando un método formal de asociación de polos. Mediante las simulaciones pudimos determinar que el diseño se realizó de manera correcta permitiendo dejar las bases para que pueda ser implementado en un futuro.

Palabras Clave: Controlador, presión, control, agua, bomba, hidroneumático

## **ABSTRACT**

*In modern industry, efficiency plays a fundamental role in each of the stages of a production line, this allows to increase the quality of the final product, reduce and avoid economic losses and the optimization of delivery times of the product. In some manufacturing processes, the water supply is essential and there are cases in which maintaining a constant pressure, is transcendental in some stages of production. Unfortunately, there are places that lack of a constant pumping pressure, this leads to problems such as waste of water, which is an essential natural resource for life and limited in certain sectors, and this waste must be unacceptable. There is also the opposite case, where the pressure is not enough to supply multiple services as planned; both scenarios implies economic losses for companies and industries.*

*By maintaining a constant pressure, users are guaranteed a quality supply, which also implies for industries a greater efficiency in scenarios that require high precision pressure of a certain fluid. For these reasons, it was proposed the design and simulation of an automated pressure control system, using as main elements a controller, pressure transducer and a variable frequency drive. The controller used was a PID which was set up with two methods, the first through tests and estimations, the second using a formal method called pole association. Through simulations we were able to test the designed system and conclude that it was designed correctly, allowing the bases for it to be implemented in a real system in the future.*

*Key Words: Controller, pressure, control, water, pump, hydro pneumatic*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Sistema de bombeo.....	4
1.4.2 Controlador PID.....	4
1.4.3 MATLAB.....	6
1.4.4 SIMULINK.....	6
1.4.5 SISOTOOL.....	7
1.4.6 Variador de Frecuencia.....	7
1.4.7 Modulación SPWM trifásico.....	9
1.4.8 Leyes de afinidad.....	12
1.4.9 Eficiencia ideal de un motor asíncrono.....	13
1.4.10 Efectos de la velocidad del motor sobre su corriente, factor de potencia y eficiencia.....	14
CAPÍTULO 2.....	15
2 METODOLOGÍA.....	15
2.1 Descripción del sistema.....	15
2.1.1 Controlador.....	16
2.1.2 Variador de Frecuencia.....	17
2.1.3 Sistema de bombeo.....	17
2.2 Modelamiento del sistema.....	18
2.2.1 Modelamiento Variador de Frecuencia.....	21
2.2.2 Modelamiento Bomba.....	23
2.3 Dimensionamiento de la planta hidroneumática.....	27

2.4	Diseño del variador de frecuencia del sistema en Simulink.....	31
2.4.1	Control y generación de pulsos PWM y SPWM. ....	31
2.4.2	Etapa de Potencia. ....	33
2.5	Diseño del sistema en lazo cerrado .....	36
2.5.1	Diseño del sistema lineal en Simulink .....	36
2.5.2	Diseño del sistema no lineal en Simulink .....	40
2.6	Sintonización del controlador y simulación en Simulink .....	43
CAPÍTULO 3.....		47
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
3.1	Resultados de la simulación del sistema lineal .....	47
3.2	Resultados de la simulación del sistema real.....	50
3.3	Análisis de costos .....	53
CAPÍTULO 4.....		56
4	Conclusiones y recomendaciones.....	56
4.1	Conclusiones .....	56
4.2	Recomendaciones .....	58
5	BIBLIOGRAFÍA.....	59
6	ANEXOS.....	60
6.1	Método de sintonización por prueba y error .....	60
	ANEXO A.....	60
	ANEXO B.....	61
	ANEXO C.....	62
6.2	Método de sintonización de asociación de polos .....	63
	ANEXO D.....	63
6.3	ANEXO E: Implementación del sistema de bombeo a presión constante para un banco de pruebas.....	64

## ABREVIATURAS

VDF	Variable Drive Frequency
PID	Proporcional, Integral y Derivativo
LGR	Lugar Geométrico de las Raíces
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
RMS	Root Mean Squared
PLC	Programmable Logic Controller
HMI	Human Machine Interface
VSI	Voltage Source Inverter
FFT	Fast Fourier Transform
THD	Total Harmonic Distortion
THDVT <sub>total</sub>	Harmonic Distortion Voltage
OS	Overshoot
PWM	Pulse Width Modulation
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IEC	International Electrotechnical Commission
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
HIL	Hardware-In-The-Loop
AAPP	Agua Potable

## SIMBOLOGÍA

RPM	Revoluciones Por Minuto
V	Voltios
Hz	Hertz
L	Litro
min	Minuto
Rev	Revolución
kWh	Kilovatios hora
kW	Kilovatios
HP	Horse Power
PSI	Pounds per Square Inch
s	Segundos
N	Newton
m	Metro
uF	Microfaradios
ma	Índice de Modulación
Arms	Amperios RMS
Vrms	Voltios RMS

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Modelo en Simulink de un generador eólico. ....	7
Figura 1.2: Etapas electrónicas del variador de frecuencia Fuente especificada no válida.....	8
Figura 1.3: Variador de Frecuencia.....	9
Figura 1.4: Señales de control y portadora (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 200).....	10
Figura 1.5: Voltaje de línea AB de salida de un inversor y su componente fundamental (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 200).....	10
Figura 1.6: Magnitud del voltaje de línea en función de $m_a$ (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 201).....	11
Figura 1.7: Leyes de afinidad (Desarrollos Digitales, <a href="http://www.webddigital.com/articulos_variadores.aspx">http://www.webddigital.com/articulos_variadores.aspx</a> .....	12
Figura 1.8: Flujo de potencia de un motor de inducción (Sen, 2012, p. 230) .....	13
Figura 1.9: Eficiencia en función de la velocidad (Sen, 2012, p. 231).....	14
Figura 1.10: Corriente del estator en función de la velocidad (Sen, 2012, p. 229)...	14
Figura 1.11: Factor de potencia en función de la velocidad (Sen, 2012, p. 230).....	14
Figura 2.1: Esquema general de un sistema de control .....	16
Figura 2.2: Diagrama de bloques de un controlador PID .....	17
Figura 2.3: Diagrama P&ID del sistema .....	18
Figura 2.4: Diagrama de bloques del variador y la bomba .....	20
Figura 2.5: Relación entre la frecuencia y el porcentaje de regulación .....	21
Figura 2.6: Relación entre el voltaje aplicado y la frecuencia.....	22
Figura 2.7: Circuito equivalente de un motor.....	23
Figura 2.8: Circuito equivalente reducido de un motor.....	23
Figura 2.9: Logo de fabricantes.....	27
Figura 2.10: Curvas características de las bombas centrífugas Pedrollo (Pedrollo, p. 2).....	28
Figura 2.11: Curva de la primera ley de afinidad $n$ vs $Q_i$ .....	28
Figura 2.12: Tanques hidroneumáticos FPS disponibles para la venta.....	29
Figura 2.13: Tanque hidroneumático horizontal FPS. ....	29
Figura 2.14: Bloque generador de pulsos SPWM .....	31
Figura 2.15: Configuraciones internas del bloque generador de pulsos SPWM .....	32

Figura 2.16: Parámetros de configuración señal triangular .....	32
Figura 2.17: Generador de señales sinusoidales .....	33
Figura 2.18: Topología de la Electrónica de Potencia de un VDF.....	33
Figura 2.19: Estructura interna del bloque generador de pulsos.....	34
Figura 2.20: Configuración de las fuentes de alimentación.....	34
Figura 2.21: Configuración ramal capacitivo .....	35
Figura 2.22: Sección de filtrado.....	35
Figura 2.23: Sección del inversor trifásico en el circuito.....	36
Figura 2.24: Diseño del controlador con la herramienta Sisotool .....	37
Figura 2.25: Diagrama de bloques del sistema lineal en lazo cerrado .....	37
Figura 2.26: Bloque controlador PI.....	38
Figura 2.27: Bloque Actuador lineal. ....	38
Figura 2.28: Bloque de la planta hidroneumática. ....	39
Figura 2.29: Bloque de generación de cambios en el consumo.....	39
Figura 2.30: Actuador no lineal .....	40
Figura 2.31: Etapa de Generación de pulsos. ....	40
Figura 2.32: Regulación de la frecuencia de entrada del motor.....	41
Figura 2.33: Regulación de Duty Cycle .....	41
Figura 2.34: Configuración parámetros del motor de la bomba .....	42
Figura 2.35: Sección del motor y conexión con el inversor .....	42
Figura 2.36: Ubicación de los polos dominantes del sistema en lazo cerrado. ....	44
Figura 2.37: Script en Matlab para calcular los parámetros del PID .....	46
Figura 2.38: Ganancias de PID determinadas por asignación de polos.....	46
Figura 3.1: Gráficas de los resultados del sistema lineal con $\alpha = 20/3450$ L/rev.....	47
Figura 3.2: Gráficas de los resultados del sistema lineal con variaciones bruscas de consumo.....	48
Figura 3.3: Gráfica del control escalar aplicado al sistema lineal.....	49
Figura 3.4: Gráficas de los resultados del sistema real con $\alpha = 20/3450$ [L/rev]. ....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Elementos del diagrama P&ID .....	19
Tabla 3.1 Eficiencias del sistema eléctrico lineal en función del ajuste del $\alpha =$ 20/3450 L/rev .....	49
Tabla 3.2 Parámetros de transición de la variable de proceso del sistema real.....	50
Tabla 3.3: Resultados del análisis de FFT para corriente y voltaje .....	52
Tabla 3.4: Potencias y eficiencias medidas.....	52
Tabla 3.5 Lista de costos de los equipos utilizados .....	53
Tabla 3.6 Lista de costos propuesta.....	54

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN.

En el año 1992, en Río de Janeiro se estableció la importancia del desarrollo sostenible de una nación y una convivencia amigable con su naturaleza. De esta forma, Ecuador participó de este programa, el cual, fue avalado por las Naciones Unidas en su Conferencia para el Medio Ambiente y Desarrollo. Posteriormente en 1997, a través del Protocolo de Kioto, se decretó, que los países en vías de desarrollo reduzcan las emisiones de efecto invernadero (María Baquero & Felipe Quesada, 2016, p. 148). Con esto, Ecuador es un país que está comprometido con un desarrollo sustentable a nivel industrial; en donde según (María Baquero & Felipe Quesada, 2016), en el 2015, el consumo en el sector industrial llegó a ser de un 43% aproximadamente y 35% en el caso del sector residencial, con respecto al consumo total nacional (p. 148). Se revela que el consumo de energía depende de varios factores, como: social, cultural, tamaño de una familia, y eficiencia de sistemas y tecnología; siendo este último de gran importancia para promover el ahorro energético y económico de un determinado sector.

Desde tiempos remotos, el agua ha sido un recurso vital para todos los seres vivos, incluyendo al hombre. De este recurso depende muchas funcionalidades internas del cuerpo humano; pues como es de saber, nuestro cuerpo necesita de agua para regular las funciones importantes regidas en nuestro organismo. En otros aspectos de la vida; el agua a nivel doméstico necesita abastecer a las familias para su consumo y limpieza; mientras que, a nivel industrial, se lo requiere en determinadas cantidades en distintas áreas que comprenden los procesos industriales; como la industria cervecera, que utiliza el agua potable como materia prima de dicho producto (Apunte Pin, 2014, p. 8).

### 1.1 Descripción del problema.

El incorrecto abastecimiento de agua potable a sectores cantonales y en especial a sectores domiciliarios, ha traído repercusiones en aspectos socio económicos (salud, trabajo, educación, etc.), como es el caso del cantón Jipijapa, ubicado al sur de la provincia de Manabí en Ecuador; donde ha

ocurrido un escaso desarrollo industrial, no pudiendo así, sobreponerse en el sector agropecuario. (Osejos, José , Oswaldo , & Luz, 2018, p. 153).

Por otra parte, la industria de embotellamiento, como es el caso de la Cervecería Nacional, ubicada en Daule – Guayas; es uno de los lugares donde más se desperdicia el agua potable debido a que este recurso es en mayor parte, su materia prima para la elaboración; representando un 70% del consumo de agua potable, 37% en embotellamiento, 20% en lavado de botellas, 14% en limpiezas, 11% en cocción, 7% en fermentación y maduración, 6% en filtraje y 5% en tratamiento de aguas (Apunte Pin, 2014, pp. 2- 4).

## **1.2 Justificación del problema.**

La importancia de llevar a cabo este proyecto radica en satisfacer el deseable suministro de agua potable (AA. PP) a sus consumidores; debido a que la demanda de este recurso depende de factores como: sociales, tamaño de las familias y el tipo de sector industrial; en especial este último, en el cual, el suministro de agua es diferente para cada línea de producción; como fue el caso de estudio de la cervecería nacional (Apunte Pin, 2014), en donde la presión para abastecerse de agua no fue constante, debido a que solo presentaban un solo tanque para alimentar a 3 líneas de producción (p. 8). Según (Nidal & Peter H); la falta de seguridad económica, llevado de la mano con el derroche energético, se debe a la escasa implementación de sistemas y tecnologías innovadoras (p.116) como es el caso de la industria ecuatoriana, en donde, aún no se ve una concientización al respecto.

Es por las razones mencionadas previamente, que el presente proyecto busca también motivar un medio ambiente sustentable en Ecuador, a través del uso adecuado de la energía eléctrica en sistemas de bombeo de AA. PP en sectores industriales, regionales o urbano-residenciales. Además, como efecto colateral; disminuir los gastos por consumo de agua y luz, mejorando el estado socio económico de quienes hacen uso de este recurso.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar y simular un controlador PID utilizando un variador de frecuencia, aplicado a un sistema de bombeo de agua, a partir del modelamiento de una planta hidroneumática, de manera que la presión se mantenga constante ante las variaciones de consumo.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar el modelo de una planta hidroneumática; mediante el uso de leyes de física, transformada de Laplace y linealización; para entender el principio de funcionamiento de la planta y además obtener los parámetros que intervienen en cada uno de sus componentes tomados de fábrica.
- Obtener la función de lazo abierto lineal y real, que permita desarrollar una simulación para determinar los parámetros del controlador PI que cumpla con las especificaciones de diseño; usando las herramientas de Matlab/Simulink.
- Analizar la presencia de armónicos que puedan influir en un mal aprovechamiento de la energía eléctrica, utilizando un análisis de transformada de Fourier, con el propósito de validar la eficiencia energética del sistema.
- Analizar la rentabilidad del proyecto; a través de una cotización de materiales y ahorro económico; basándose en los ingresos que se producen en las empresas.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Sistema de bombeo

Los sistemas de bombeo son bastante utilizados en procesos donde se involucre el transporte o descarga de fluidos.

Para dicho bombeo hay diferentes tipos de bombas, y la elección hacia un tipo en específico se dará en función de la aplicación que se quiera realizar; en los sistemas de bombeo de agua se utilizan las bombas centrífugas y volumétricas. Las bombas centrífugas pueden ser utilizadas para varios líquidos, ya sea de alta o baja viscosidad y en situaciones donde se requiera un alto caudal. Las bombas volumétricas son más utilizadas en situaciones donde se requiera un bajo caudal y una alta presión o para ser utilizados con líquidos de bastante viscosidad o donde se presenten elementos sólidos en el fluido.

En casos donde se requiera precisión, ya sea de caudal o presión al momento de consumir, se pueden utilizar controladores que regulen dichas variables de proceso en el sistema.

### 1.4.2 Controlador PID

Es una técnica de regulación que constas de tres componentes; proporcional, integral y derivativo.

La función de transferencia se muestra en la ecuación 1.1, la cual muestra de manera implícita, la ganancia del controlador  $G_c(s)$ , un polo en el origen y dos ceros (Mazzone, p. 1).

$$G_c(s) = K_c * \frac{\tau_I \tau_D s^2 + \tau_I s + 1}{\tau_I s} \quad (1.1)$$

Dependiendo de las especificaciones que se requieran en la respuesta de una variable de proceso (PV), el controlador puede ser un PID, P, I o PI; que por lo general son los más utilizados. Por ejemplo, la ecuación 1.2, muestra la función de transferencia de un controlador PI.

$$G_c(s) = K_c * \frac{s + K_i/K_c}{s} \quad (1.2)$$

### Ganancia Proporcional [ $K_c$ ]:

Sus efectos en el sistema en lazo cerrado con entrada tipo escalón son:

- Permite que la planta sea más rápida.
- Genera mayor ganancia de lazo cerrado.
- Disminuir el error de la respuesta en lazo cerrado.

### Tiempo Integral [ $\tau_I$ ]

Este parámetro se puede expresar como una ganancia integral, de tal manera que se tiene la ecuación 1.3

$$K_I = \frac{K_c}{\tau_I} \quad (1.3)$$

Los efectos que causa en la respuesta de lazo cerrado con entrada tipo escalón son:

- A medida que el  $\tau_I$  decrece, la respuesta en lazo cerrado es más rápida.
- El error en estado estacionario es cero.
- A medida que el  $\tau_I$  disminuye, el sobre nivel porcentual de la respuesta en lazo cerrado aumentar y esto se debe tener precaución.

### Tiempo Derivativo [ $\tau_D$ ]

Este parámetro se puede expresar como una ganancia derivativa, de tal manera que se tiene la ecuación 1.4

$$K_D = K_c * \tau_D \quad (1.4)$$

Los efectos que causa en la respuesta de lazo cerrado con entrada tipo escalón son:

- El error en estado estacionario es cero.
- Hace que la respuesta de la planta sea más lenta de lo normal.

### **1.4.3 MATLAB**

Es un software utilizado con la finalidad de poder realizar operaciones matemáticas ya sea simples o complejas. Es ampliamente utilizado en el campo de las ciencias aplicadas y por investigadores debido a su gran capacidad de cómputo, herramientas y complementos que permiten al usuario realizar simulaciones complejas o implementar algoritmos para un fin determinado. Posee su propio lenguaje de programación, nombrado lenguaje M el cual es solo modificable en la interfaz de usuario de Matlab.

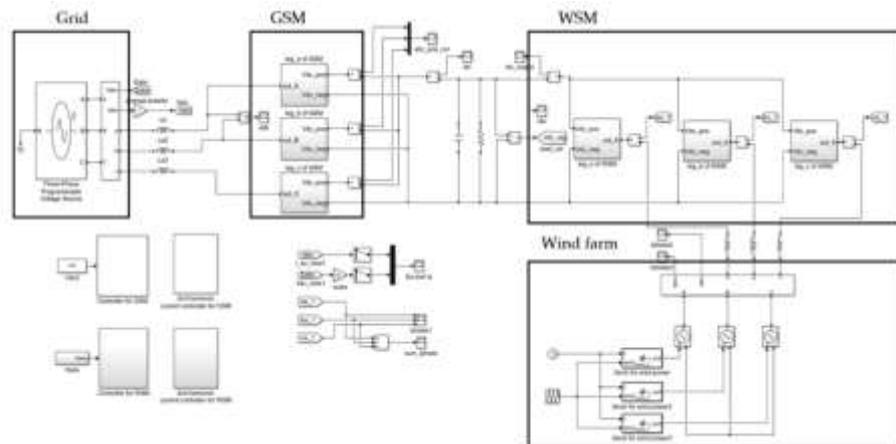
Dentro de las principales herramientas de trabajo que se utilizan en Matlab para la elaboración de este proyecto son: SIMULINK y SISOTOOL.

### **1.4.4 SIMULINK**

Es un complemento de MATLAB, bastante útil para poder realizar la programación de sistemas de todo tipo. SIMULINK funciona en conjunto con MATLAB trayendo al usuario un entorno de programación de tipo gráfico mediante el cual a través de bloques puede realizar simulación de sistemas o modelos.

Su utilidad para simular sistemas es algo bastante destacado para poder disminuir costos ya que a través de simulaciones HIL (Hardware-In-The-Loop por sus siglas en inglés), permite a los desarrolladores poder realizar pruebas en el software antes de realizar alguna prueba en un prototipo físico, reduciendo así, costos de manufactura de prototipos, una mayor rapidez para detectar y corregir errores. En la Figura 1.1 se puede observar

el modelo de un generador eólico, donde el diseño total fue realizado por los desarrolladores en SIMULINK lo cual además les permitió realizar simulaciones antes de implementar el proyecto físicamente.



**Figura 1.1: Modelo en Simulink de un generador eólico.**

#### 1.4.5 SISOTOOL

Es una herramienta de Matlab, que permite el diseño de controladores y/o compensadores que permitan cumplir con las especificaciones de diseño del sistema de lazo cerrado, mediante el uso de diagramas de bode o el lugar geométrico de las raíces (LGR).

#### 1.4.6 Variador de Frecuencia

Un variador de frecuencia es un dispositivo de campo que permite configurar la velocidad de un motor AC, a través de diferentes modos de control que son ofrecidos en el dispositivo según su fabricante.

Los modos de control que usualmente se utilizan son:

- Control Escalar (V/f)
- Control Vectorial/ Vector Espacial.

##### Control Escalar

Es un sistema de regulación de velocidad, el cual consiste en variar de manera proporcional la frecuencia de alimentación ( $f_1$ ) del motor con su

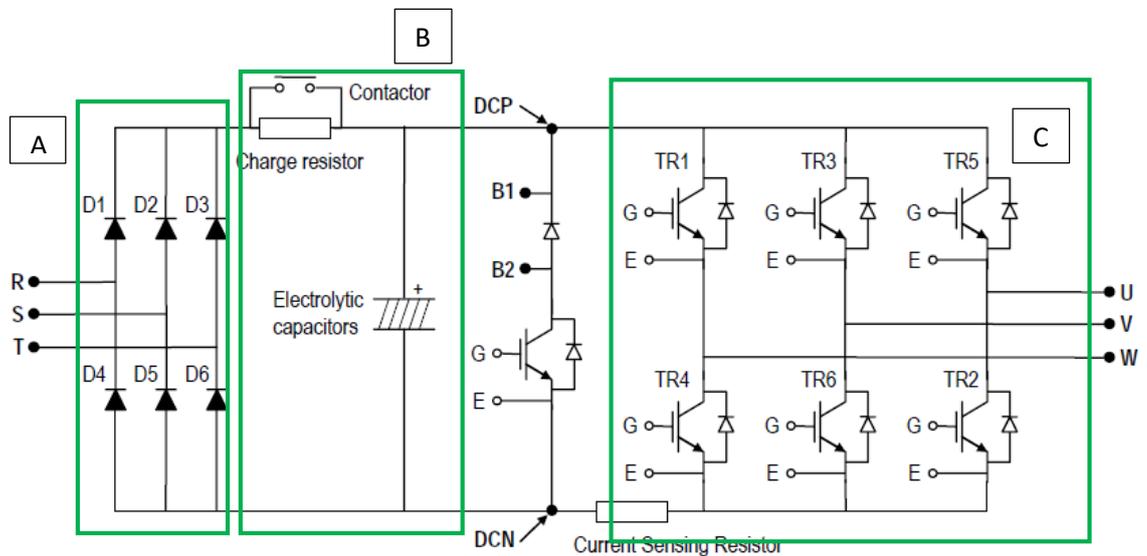
voltaje de estator ( $V_1$ ) con el propósito de mantener constante el flujo de entre hierro, sin saturar el entrehierro de la máquina; como se muestra en la ecuación 1.5 y 1.6. Así el par desarrollado por la máquina se mantiene constante debido a que éste depende del flujo ( $\phi_m$ ) (Mora Jesús, p. 719).

$$V_1 \approx E_1 = 4.44 K_1 f_1 N_1 \phi_m \quad (1.5)$$

$$\phi_m = \frac{V_1}{4.44 K_1 f_1 N_1} \quad (1.6)$$

### Electrónica de Potencia del variador de frecuencia

La topología de un variador de frecuencia se compone de tres etapas, como se muestra en la Figura 1.2.



**Figura 1.2: Etapas electrónicas del variador de frecuencia** Fuente especificada no válida.

La etapa A consiste en rectificar la entrada de alimentación AC; seguida de la etapa B, que permite filtrar la señal rectificada para obtener un valor DC; el cual va a la etapa C perteneciente a un inversor. Las señales TR1, TR2, TR3, TR4, TR5 y TR6, son las señales de control proporcionados por mismo el dispositivo, el cual lo realiza a través de distintas técnicas de modulación que ofrece el variador, según su fabricante.

El ramal DCP-DCN de la figura anterior, permite conectar una resistencia de potencia para frenados no regenerativos.

En la Figura 1.3 se puede observar la imagen de un variador de frecuencia, por lo general, comparten características estéticas entre distintos modelos o fabricantes.



**Figura 1.3: Variador de Frecuencia**

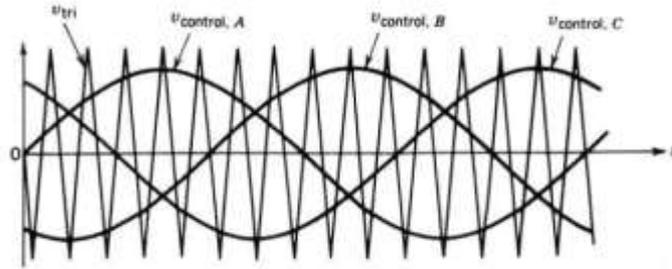
#### **1.4.7 Modulación SPWM trifásico**

Es una técnica que modula las señales que accionan los dispositivos de conmutación de un VSI trifásico, a través de una señal portadora y de tres señales de control o modulantes de tipo seno.

Las señales de control son sinusoidales que están desfasadas 120 grados entre ellas y oscilan entre 0 a 60 Hz; permitiendo que coincidan con las frecuencias de las salidas eléctricas del inversor.

La señal portadora, por lo general es un triangular de mayor frecuencia, por lo que permite definir la modulación del ancho de los pulsos.

Como se muestra en la Figura 1.4, cada una de las señales de control (modulantes) son comparadas con la señal de la portadora; lo cual permite la generación de pulsos que accionan los dispositivos de conmutación, dando lugar a voltajes (Figura 1.5) y corrientes de línea (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 199).



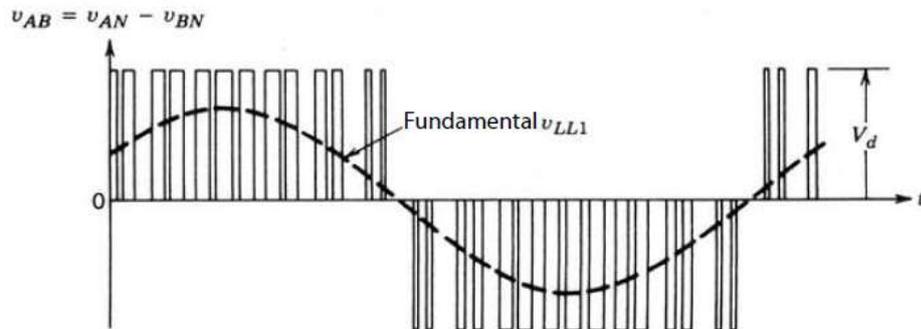
**Figura 1.4: Señales de control y portadora**  
(Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 200)

Cada señal modulante se define como se muestra en las siguientes ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9.

$$v_{mA}(t) = V_m * \sin(2\pi * f_m * t) \quad (1.7)$$

$$v_{mB}(t) = V_m * \sin(2\pi * f_m * t + 2\pi/3) \quad (1.8)$$

$$v_{mC}(t) = V_m * \sin(2\pi * f_m * t + 4\pi/3) \quad (1.9)$$



**Figura 1.5: Voltaje de línea AB de salida de un inversor y su componente fundamental** (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 200)

Según (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 180), la relación de las amplitudes entre las señales modulante y portadora se conoce como índice de amplitud; el cual, se define como se muestra en la ecuación 1.10.

$$m_a = \frac{V_m}{V_p} \quad (1.10)$$

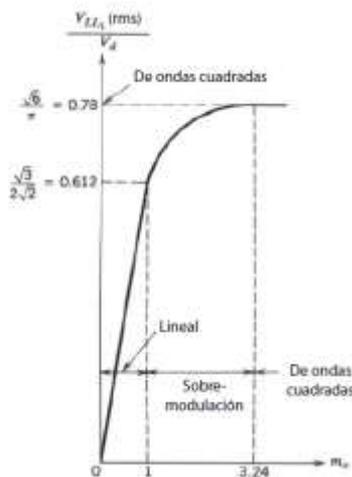
Por otra parte, el índice de modulación de frecuencia relaciona la frecuencia de conmutación de los IGBT con respecto a la frecuencia de modulación (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 180), tal como se muestra en la ecuación 1.11

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (1.11)$$

### Consideraciones del índice $m_a$

Según el rango de operabilidad de  $m_a$ , se trabaja ya sea en modulación lineal ( $m_a$  entre 0 a 1) o en sobre modulación ( $m_a > 1$ ). Cuando se trabaja en sobre modulación se corre con el riesgo de crear armónicos en las bandas laterales de las frecuencias de orden  $m_f$  y sus múltiplos (Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 201). De la Figura 1.6, se puede generalizar el voltaje de línea de la fundamental cuando se opera en la zona lineal, derivando en la ecuación 1.12; donde  $V_d$  corresponde al voltaje en la barra DC.

$$V_{LL1(rms)} = 0.612 * m_a * V_d \quad (1.12)$$



**Figura 1.6: Magnitud del voltaje de línea en función de  $m_a$**   
(Mohan, Undeland, & Robbins, 2009, p. 201)

### Consideraciones del índice $m_f$

Para eliminar los armónicos, el índice de modulación debe ser un entero impar y si este es múltiplo de 3, también terminará eliminando aquellos armónicos múltiplos de 3.

Para aquellos  $m_f > 21$ , son considerados como índices de modulación grandes; que con un PWM asíncrono ( $m_f$  no es un entero), se usan en aplicaciones donde la frecuencia de la portadora se mantiene constante; pero la frecuencia modulante es variable. Esta modulación de tipo asíncrona incita a la generación de armónicos de orden cero o cercanos; causantes de corrientes muy altas en un motor AC. Por otra parte, los índices de modulación  $m_f$  que son menores o iguales a 21, son considerados como pequeños; los cuales son aplicados de mejor manera en modulaciones PWM síncronas ( $m_f$  es un entero).

#### 1.4.8 Leyes de afinidad

Son tres leyes que definen la relación del flujo, presión (par) y la potencia que el motor requiere para mover la bomba. La Figura 1.7, muestra la dinámica de cada una de estas variables con respecto a la velocidad de giro del motor de la bomba.

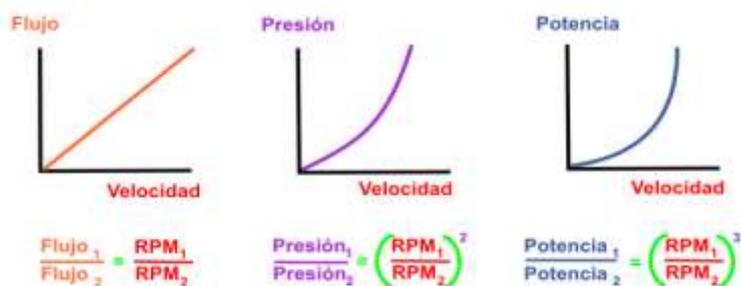


Figura 1.7: Leyes de afinidad (Desarrollos Digitales, [http://www.webddigital.com/articulos\\_variadores.aspx](http://www.webddigital.com/articulos_variadores.aspx))

### 1.4.9 Eficiencia ideal de un motor asíncrono

De manera general la eficiencia de un motor asíncrono es la relación (Ecuación 1.13) que existe entre la potencia útil de la máquina con la potencia de entrada, considerando todas las pérdidas involucradas, que se muestran en la Figura 1.8.

$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.13)$$

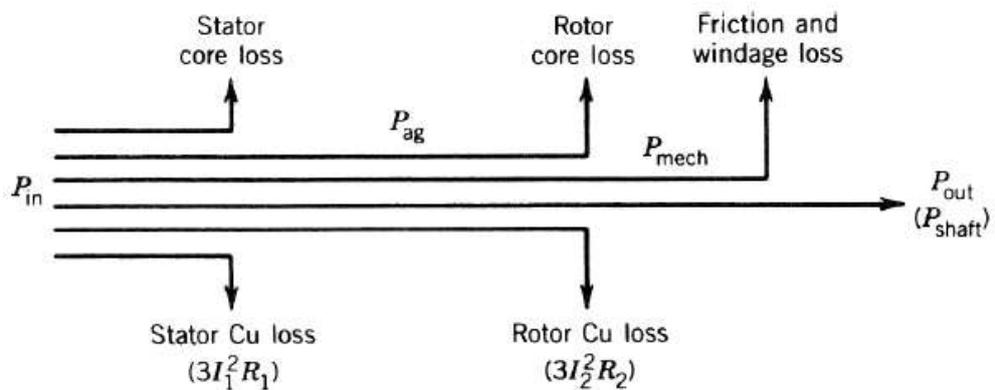


Figura 1.8: Flujo de potencia de un motor de inducción (Sen, 2012, p. 230)

Por lo tanto, la eficiencia ideal parte del criterio de despreciar todas las pérdidas en el estator y núcleo del motor de inducción; de tal manera que se tiene:

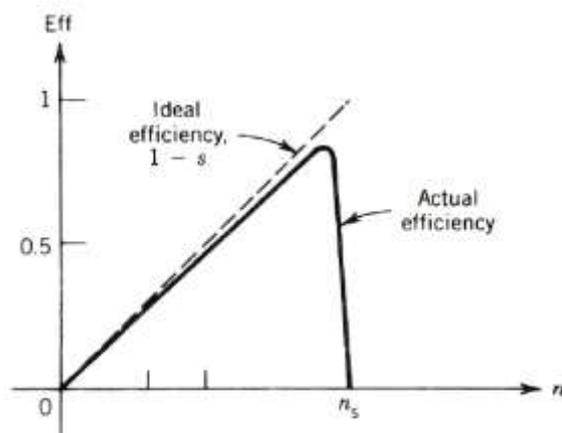
$$P_{in} = P_{ag} \quad (1.14)$$

$$P_{out} = P_{ag}(1 - s) \quad (1.15)$$

$$Eff_{ideal} = (1 - s) \quad (1.16)$$

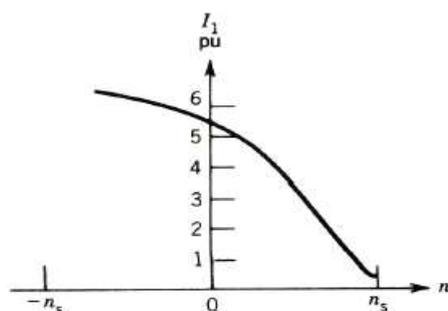
#### 1.4.10 Efectos de la velocidad del motor sobre su corriente, factor de potencia y eficiencia.

La gráfica de la figura 1.9, muestra la relación entre la eficiencia y la velocidad de la máquina, donde se tiene que, en velocidades pequeñas la eficiencia real e ideal son las mismas.

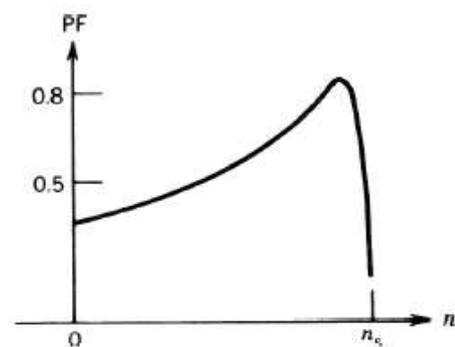


**Figura 1.9: Eficiencia en función de la velocidad** (Sen, 2012, p. 231).

La Figura 1.10 muestra que la corriente del estator del motor llega a ser más grande a medida que la velocidad disminuye; pero el factor de potencia disminuye según la Figura 1.11.



**Figura 1.11: Corriente del estator en función de la velocidad** (Sen, 2012, p. 229).



**Figura 1.10: Factor de potencia en función de la velocidad** (Sen, 2012, p. 230).

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

Se empezó con el modelamiento de la planta y del sistema actuador; de esta manera, se pudieron hallar sus respectivas funciones de transferencia. Posteriormente en Simulink y con la disponibilidad de la librería Simscape, se elaboró la programación de un variador de frecuencia (VDF) con sus respectivas etapas de potencia y generación de pulsos. Finalmente se desarrolló dos tipos de sistemas de lazo cerrado; uno lineal, donde se encontraron los parámetros del PI a través del Toolbox de Matlab, SISOTOOL; y el otro sistema no lineal, en donde se implementó el VDF previamente mencionado y el PI fue encontrado por prueba y error.

### 2.1 Descripción del sistema

Si se requiere implementar el sistema que se describe en este documento, se deben considerar ciertos detalles adicionales dependiendo de la magnitud del proyecto, sobre todo en cuestiones de dimensionamiento; por ejemplo, si el sistema de distribución es grande puede que se requiera de tuberías de un determinado calibre que soporten altas presiones y de igual manera el elemento de medición de las variables físicas tendrá que ser elegido de acorde a rangos establecidos en el proyecto.

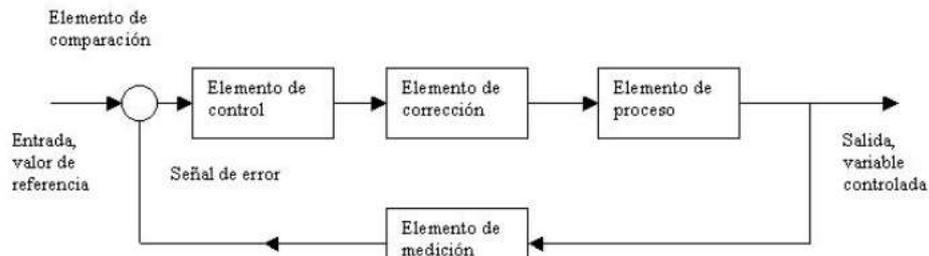
De manera general, el sistema propuesto está compuesto de la siguiente serie de elementos, que garantizan un correcto funcionamiento y control para el proceso de distribución de agua a una presión constante.

Como se puede observar en la Figura 2.1, se tiene un diagrama de bloques bastante generalizado del sistema de control implementado; en la vida real los elementos de medición son por lo general sensores o transductores, para la implementación física de este proyecto lo recomendable sería utilizar un transductor de presión. El elemento de control utilizado en este proyecto es el controlador PID, cuya función como se ha mencionado previamente es disminuir el error que existe entre el valor de referencia y el valor actual del elemento de medición. El diseño del elemento de control fue la parte más

crítica e importante en la realización de este proyecto debido a que para obtener los mejores resultados posibles el sistema debe estabilizarse rápidamente y esto en gran medida depende de los parámetros establecidos en el controlador.

Siguiendo con el esquema de la Figura 2.1, se utilizó como elemento de corrección de este sistema un variador de frecuencia, cuya principal función es aumentar o disminuir la velocidad del motor en la bomba para de esa manera lograr los cambios necesarios en la presión del sistema.

Finalmente, el elemento de proceso o la planta como se suele llamar por lo general es el sistema de bombeo el cual para el desarrollo de este proyecto fue necesario realizar un modelamiento matemático, dicho modelamiento describe y relaciona cada una de las variables del proceso con los elementos que conforman al sistema de bombeo.



**Figura 2.1: Esquema general de un sistema de control**

### 2.1.1 Controlador

La elección de un controlador para procesos queda a criterio de las necesidades del usuario, en la gran mayoría de los casos la elección será un controlador PID o alguna de sus variables esto dependerá de cómo reaccione el sistema a las ganancias del controlador ya que en ciertos sistemas la estabilidad se ve comprometida al introducir una componente derivativa debido a que son muy sensibles al ruido.

El controlador implementado en el desarrollo del sistema fue un controlador de tipo PI. Se eligió este controlador por encima de un controlador PID debido a que, añadir una ganancia derivativa al sistema no significó en lo absoluto una mejora en la estabilidad del sistema en la simulación y porque

existe la posibilidad al ser implementado en un sistema real, que el ruido influya negativamente en la respuesta del sistema.

Como se puede observar en la Figura 2.2, un controlador PID actúa sobre la planta y su finalidad es tratar de corregir el error del sistema; el error es medido entre el valor final  $y(t)$  y el valor que se quiere obtener  $u(t)$ . Los parámetros (P, I, D) se ajustaron en función de las especificaciones del sistema, permitiendo una rápida estabilización y un error de estado estable igual a cero.

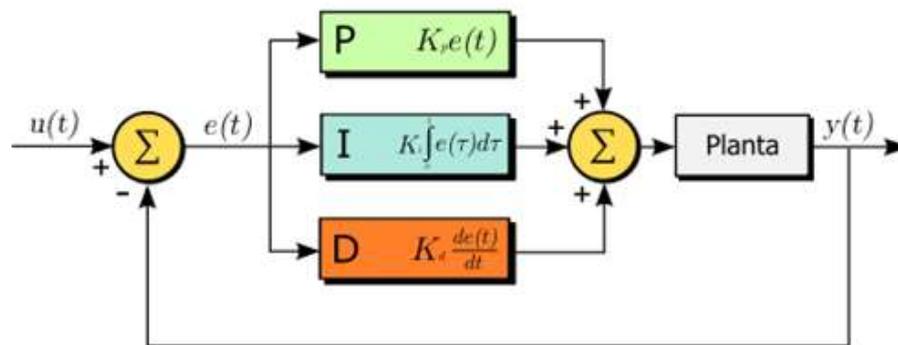


Figura 2.2: Diagrama de bloques de un controlador PID

### 2.1.2 Variador de Frecuencia

Dependiendo del modelo se pueden encontrar o no ciertas funciones que son de interés para el usuario final; idealmente para el propósito de este proyecto, se requiere que el variador de frecuencia incorpore un controlador PID para poder con eso abaratar costos y que el control total del sistema sea realizado por el variador de frecuencia. En caso de que no se disponga de un variador de frecuencia con un controlador PID integrado entre sus funciones, otra de las opciones a considerar puede ser la compra de un PLC.

### 2.1.3 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo va a depender de los requerimientos del proceso ya que para una planta grande es posible que se requiera de un sistema de bombeo con motores de alta potencia. Este proyecto y el modelamiento del sistema de bombeo fue realizado tomando las características de sistema

de bombeo de la marca Pedrollo, ya que conocíamos de antemano los parámetros y detalles del motor, permitiendo así realizar un modelamiento más cercano al sistema real.

A pesar de que el modelamiento fue realizado con las características del motor mencionado, el principio es el mismo en caso de que se requiera aplicar este proyecto a otro sistema de bombeo con otro motor.

## 2.2 Modelamiento del sistema

Para realizar el modelamiento se obtuvieron previamente los datos de placa de un motor de bomba de la marca Pedrollo, el cual vino monofásico desde fábrica; el cual, fue rebobinado para convertirla a trifásica jaula de ardilla; a partir de aquí se conoce:

- Voltaje de alimentación: 220 VAC.
- Potencia: 0.5 hp (375 W).
- Frecuencia: 60 Hz.
- Velocidad 3450 RPM
- Corriente de línea 2 Arms.

En la Figura 2.3, se puede observar el diagrama P&ID del sistema, mediante el cual logramos determinar las variables del proceso y el orden en que se ejecutan las acciones.

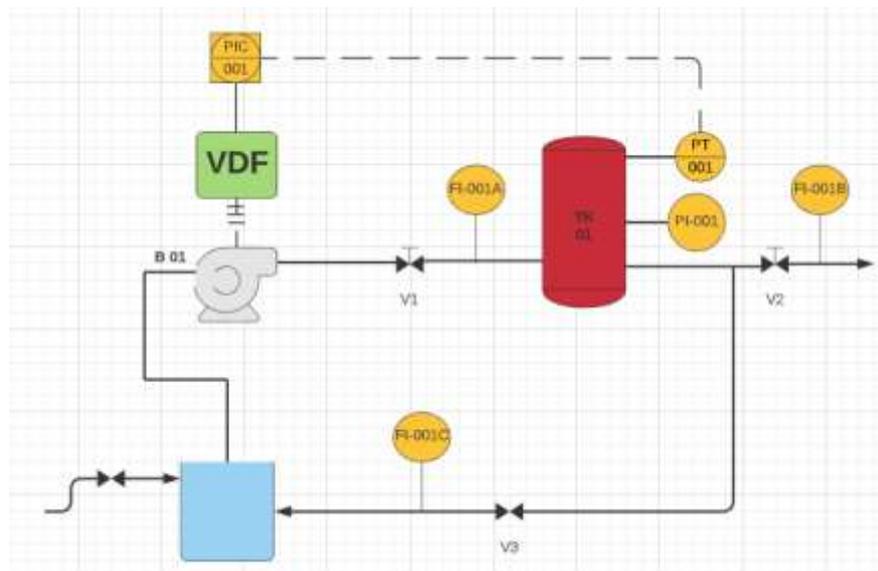


Figura 2.3: Diagrama P&ID del sistema

En la Tabla 2.1 se observa una descripción de cada uno de los elementos que componen el diagrama P&ID de la Figura 2.3, esta información es de importancia en caso de que se quiera implementar este sistema físicamente.

PI	Manómetro de campo
PT	Transductor de Presión
PIC	Controlador
V1	Válvula manual
V2	Válvula manual
V3	Válvula de alivio
VDF	Variador de Frecuencia
TK 01	Tanque Hidroneumático
B 01	Bomba motorizada trifásica
TK 02	Depósito abierto
FI-001A	Caudalímetro
FI-001B	Caudalímetro
FI-001C	Caudalímetro

**Tabla 2.1 Elementos del diagrama P&ID**

Con la información y el modelo del sistema de la Figura 2.3 se procedió a realizar el modelamiento matemático donde inicialmente se obtuvieron las siguientes ecuaciones que describen parte del funcionamiento del sistema de bombeo.

$$q_i - q_o - Q = \frac{dv}{dt} \quad (2.1)$$

$$V_g = \frac{\beta}{V} \quad (2.2)$$

$$P * V_g = n * R * T \quad (2.3)$$

Combinando las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 se procedió a despejar la presión (P) lo cual dejó como resultado la siguiente ecuación:

$$P(t) = \left[ \frac{n * R * T}{\beta} \right] * \int (q_i - q_o - Q) dt \quad (2.4)$$

$$P(s) = \frac{n * R * T}{\beta} * \left[ \frac{Q_i(s) - Q_o(s) - Q}{S} \right] \quad (2.5)$$

Para poder obtener una función de transferencia uno de los pasos necesarios fue realizar la transformada de LaPlace a la ecuación 2.4:

Finalmente evaluando en la ecuación 2.5 cuando  $Q_i(s) = 0$  y cuando  $Q_o(s) = 0$  se obtuvieron las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{P(s)}{Q_i(s)} = \frac{n * R * T}{\beta} * \left[ \frac{1}{S} \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{P(s)}{Q_o(s)} = - \frac{n * R * T}{\beta} * \left[ \frac{1}{S} \right] \quad (2.7)$$

En la Figura 2.4 se puede observar el diagrama de bloques que describe la interacción entre el variador de frecuencia (Gvdf) y la bomba del sistema (Gb) con las variables del proceso, a partir de este diagrama y las Figuras 2.5 y 2.6 comenzó el planteamiento de las ecuaciones correspondientes utilizadas para realizar el modelamiento matemático del sistema.

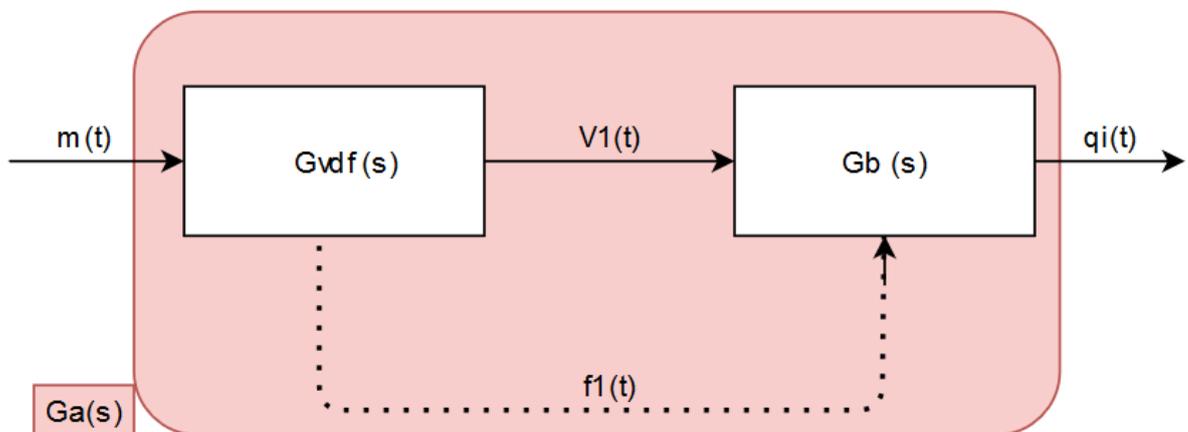


Figura 2.4: Diagrama de bloques del variador y la bomba

### 2.2.1 Modelamiento Variador de Frecuencia

El caudal inicial  $Q_i(t)$  está dado en función de los procesos realizados por la bomba, que a su vez dependen del variador de frecuencia.

Las relaciones obtenidas en las ecuaciones 2.8 y 2.9 se obtienen de la Figura 2.5, donde se puede observar la relación que existe entre la frecuencia de trabajo del variador y el porcentaje de la señal de regulación  $m(t)$ .

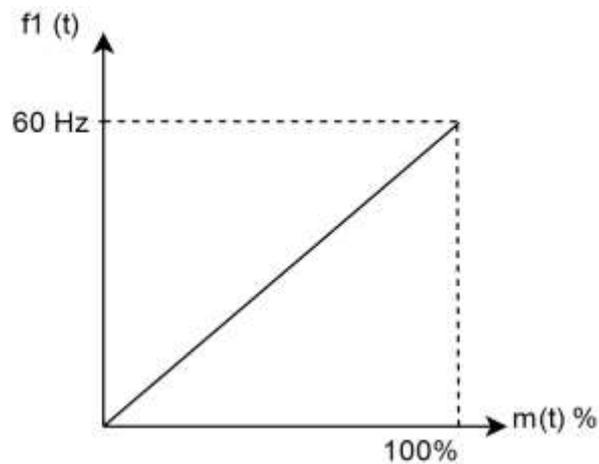
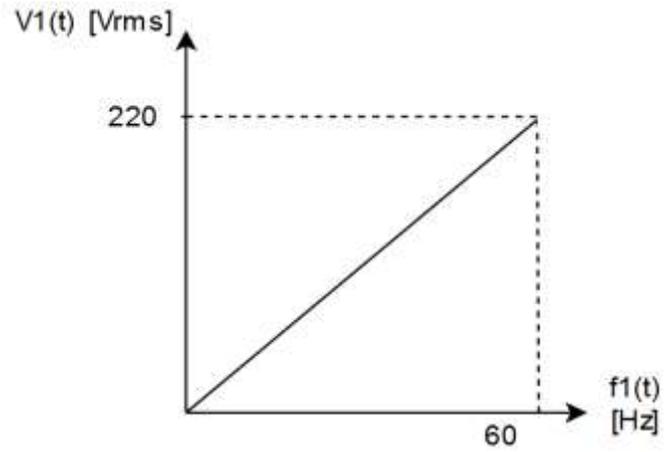


Figura 2.5: Relación entre la frecuencia y el porcentaje de regulación

$$f_1(t) = K_f * m(t) \quad (2.8)$$

$$\frac{F_1(S)}{M(S)} = K_f \quad (2.9)$$

Las relaciones obtenidas en las ecuaciones 2.10 y 2.11 se obtienen del análisis de la Figura 2.6, donde se puede observar la relación que existe entre el voltaje y la frecuencia que suministra el variador de frecuencia.



**Figura 2.6: Relación entre el voltaje aplicado y la frecuencia**

$$V_1(t) = \frac{220}{60} * f_1(t) \quad (2.10)$$

$$\frac{V_1(S)}{F_1(S)} = \frac{220}{60} = K_{vf} \quad (2.11)$$

Finalmente, en la ecuación 2.12 se pudo obtener la función de transferencia que describe el funcionamiento del variador de frecuencia en función de variables conocidas del proceso.

$$G_{vdf} = \frac{V_1(S)}{M(S)} = K_f * K_{vf} \quad (2.12)$$

### 2.2.2 Modelamiento Bomba

Se conoce que el circuito de un motor se asemeja al observado en la Figura 2.7, con aquel circuito, pudimos obtener ecuaciones que nos permitieron modelar el funcionamiento de la bomba.

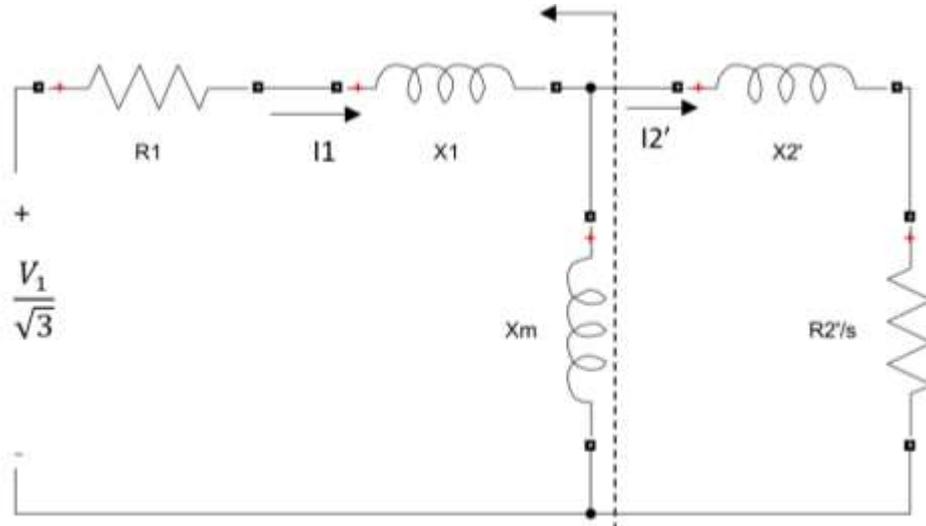


Figura 2.7: Circuito equivalente de un motor.

Para tener una mayor facilidad en los cálculos y tener las expresiones de manera correcta, del esquemático de la Figura 2.7, se procedió a sacar el voltaje y resistencia de Thévenin para obtener el circuito equivalente que se muestra en la Figura 2.8

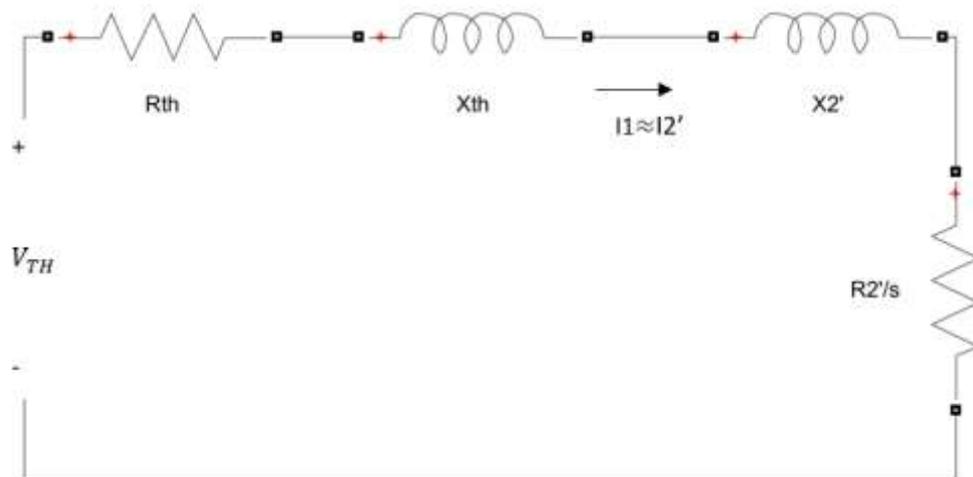


Figura 2.8: Circuito equivalente reducido de un motor.

A partir de la Figura 2.8 se empezaron a obtener las expresiones que relacionan las variables físicas del motor.

$$V_{th} = \frac{X_m}{R_1^2 + (X_m + X_1)^2} * \frac{V_1}{\sqrt{3}} \quad (2.13)$$

$$Z_{th} = (R_1 * jX_1) \parallel jX_m \quad (2.14)$$

En la ecuación 2.13 se puede observar la ecuación obtenida para calcular el voltaje de Thévenin del circuito, se sabe que por lo general en este tipo de análisis se considera lo siguiente:

- $X_1 + X_m \gg R_1$
- $X_m \gg X_1$

Con las consideraciones mencionadas previamente se puede obtener como resultado la siguiente aproximación observada en la ecuación 2.15, este es el voltaje de Thévenin del circuito:

$$V_{th} \approx \frac{V_1}{\sqrt{3}} \quad (2.15)$$

Para obtener el valor de la resistencia de Thévenin del sistema se resolvió y simplificó la ecuación 2.14, considerando además que  $X_1 + X_m \approx X_m$  para facilitar los cálculos, esto dejó como resultado la ecuación 2.16.

$$Z_{th} = R_1 + jX_1 \quad (2.16)$$

Fue necesario obtener el Torque del motor para poder realizar una correcta relación entre la velocidad y el voltaje del motor. Esto se realizó a partir del desarrollo de las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.19 las cuales involucran variables como las potencias y corrientes del motor.

$$P_{mec} = T(1 - s)W_S \quad (2.17)$$

$$P_{cu} = S * P_{ag} \quad (2.18)$$

$$P_{cu} = 3 * I_2'^2 * R_2' \quad (2.19)$$

$$P_{ag} = P_{cu} + P_{mec} \quad (2.20)$$

Debido a que la ecuación 2.19 involucraba la corriente  $I'_2$  se necesitaba una ecuación que relacione las variables del circuito con la corriente; para llegar a aquella expresión se requirió de un análisis del circuito dando como resultado la ecuación 2.21

$$I'_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + R'_2/S)^2 + (X_m + X_1)^2}} \quad (2.21)$$

Reemplazando las ecuaciones 2.17, 2.18, 2.19 y 2.21 en la ecuación 2.20 se procedió a realizar el correspondiente desarrollo y despeje del Torque del motor (T) dejando como resultado la ecuación 2.22.

$$T = \frac{3 * V_{th}^2 * S}{W_s * R'_2} \quad (2.22)$$

Se reemplazó la expresión del deslizamiento (S) en la ecuación 2.22 con su equivalente relacionándola con las velocidades rotacionales del motor las cuales se pueden observar en la ecuación 2.23

$$S = \frac{W_s * W_r}{W_s} \quad (2.23)$$

Se conoce que las velocidades rotacionales se pueden definir como se observa en la ecuación 2.24.

$$W_s = 2\pi f \quad (2.24)$$

Después de reemplazar las ecuaciones 2.23 y 2.24 en la ecuación 2.22 se tuvo como resultado la ecuación 2.27.

$$K_{VDF1} * V_1(t) - K_{VDF2} * W_r = K_m W_r^2 = T \quad (2.27)$$

Por simplicidad, se definieron las variables  $K_{VDF1}$  y  $K_{VDF2}$ ; en las ecuaciones 2.25 y 2.26 se puede observar a que son equivalentes estas variables, esto

fue realizado para poder realizar una manipulación de las ecuaciones de una manera más práctica.

$$K_{VDF1} = \frac{V_1}{2\pi R_2' f_1} \quad (2.25)$$

$$K_{VDF2} = \frac{V_1^2}{(2\pi f_1)^2 * R_2'} \quad (2.26)$$

Se procedió a linealizar la expresión  $T = K_m W_r^2$ ; una vez linealizada expresión, se procedió a reemplazar la función linealizada en la ecuación 2.27 y se despejó de aquella combinación la velocidad angular del rotor, dejando como resultado la expresión 2.28.

$$W_r(t) = \frac{K_{VDF1} * V_1(t)}{K_{VDF2} + 2K_m W_{rop}} \quad (2.28)$$

Finalmente se procede a relacionar la variable  $Q_i$  con la ecuación 2.28, esto mediante la expresión 2.29; la cual, se obtiene a partir de las leyes de afinidad.

$$q_i(t) = \alpha W_r(t) \quad (2.29)$$

Despejando y aplicando la transformada de LaPlace para poder obtener una función de transferencia que relacione las variables del proceso se logró desarrollar la ecuación 2.30

$$\frac{Q_i(s)}{V_1(s)} = \frac{\alpha K_{VDF1}}{K_{VDF2} + 2K_M W_{rop}} \quad (2.30)$$

Debido a que el valor obtenido de  $K_m$  fue bastante pequeño la ecuación 2.30 se reduce a la observada en la ecuación 2.31. Esta ecuación es la función de transferencia de la bomba; la cual no depende de los parámetros internos del motor de la bomba.

$$\frac{Q_i(s)}{V_1(s)} = \frac{\alpha * K_{VDF1}}{K_{VDF2}} = \alpha * \frac{2\pi * f_1}{V_1} = G_B(s) \quad (2.31)$$

Para finalizar, la ecuación 2.32 describe la función de transferencia final  $G_A(s)$  la cual se definió gráficamente en la Figura 2.4. Esta es la función de transferencia del sistema compuesto por el variador de frecuencia y la bomba.

$$G_A(s) = K_F * K_{VF} * \frac{\alpha * 2\pi * f_1}{V_1} \quad (2.32)$$

### 2.3 Dimensionamiento de la planta hidroneumática

Utilizando las ecuaciones del modelamiento y teniendo a disposición los catálogos u hojas de datos de los diferentes fabricantes de bombas y tanques hidroneumáticos; es posible dimensionar la ganancia de la planta y la constante  $\alpha$  [L/rev] de la ecuación 2.29.

Se escoge FPS, como fabricante de tanques hidroneumáticos y Pedrollo como el fabricante de bombas (Ver Figura 2.9).



**Figura 2.9: Logo de fabricantes.**

Pedrollo pone a disposición, un catálogo con información y curvas características de sus bombas. Para propósitos de simulación de este proyecto, se escogió el modelo de la bomba CP600; donde la Figura 2.10, muestra su curva característica.

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

60 Hz n= 3450 min<sup>-1</sup> HS= 0 m

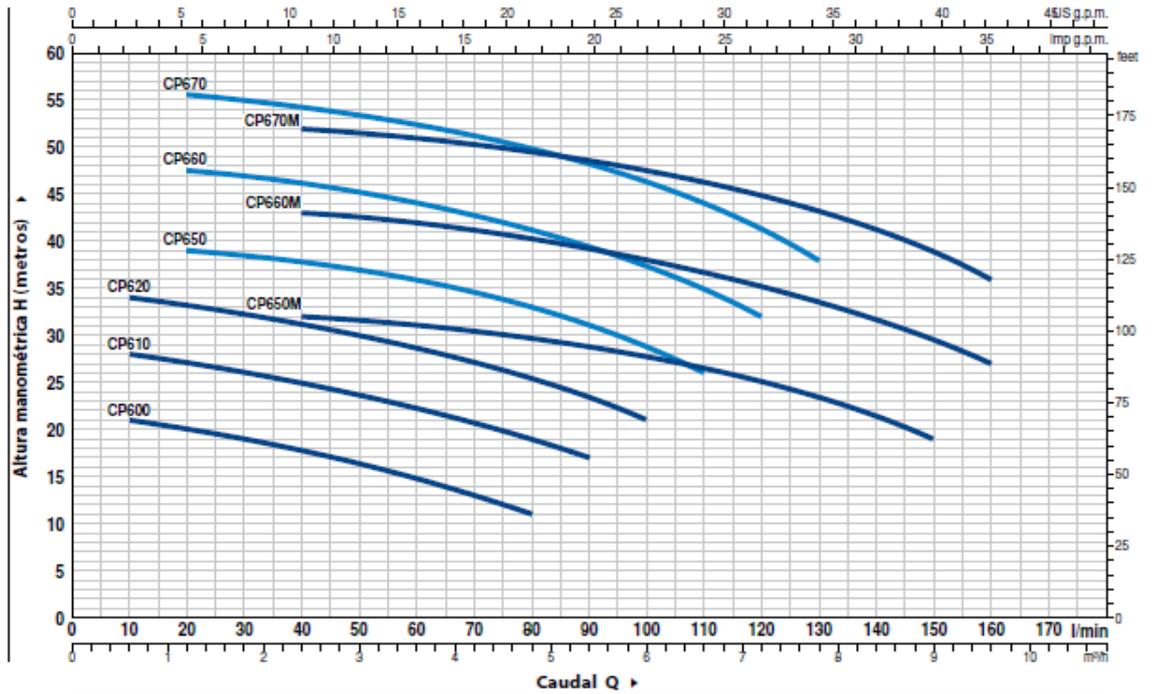


Figura 2.10: Curvas características de las bombas centrífugas Pedrollo (Pedrollo, p. 2).

Con los datos de esta curva se pudo obtener una relación que se supone como lineal entre el caudal que aporta la bomba con respecto a su velocidad; por lo que es posible determinar un valor de  $\alpha$  como se muestra en la Figura 2.11 y hallado su pendiente mediante la ecuación 2.33.

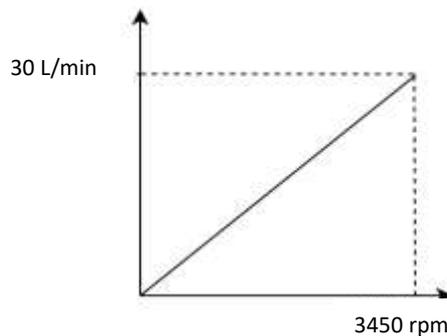


Figura 2.11: Curva de la primera ley de afinidad n vs Qi

$$\alpha = \frac{30 \text{ L/min}}{3450 \text{ rpm}} = 8.69 \times 10^{-3} \text{ [L/rev]} \quad (2.33)$$

Para determinar la ganancia de la planta, se dimensionó primeramente las características de un tanque hidroneumático, teniendo en cuenta que, para propósitos de una simulación, se considera una presión de trabajo de 25 [PSI] y caudal de trabajo de 16.15. De acuerdo con (FPS, p. 4), el procedimiento para dimensionar un tanque hidroneumático para presión constante depende de la presión de precarga y del volumen del tanque.

$$P_{precarga} = 0.7 * P_{trabajo} [PSI] \quad (2.34)$$

$$V_{tanque} = \frac{Q_{trabajo}}{10} [Gal] \quad (2.35)$$

La presión de precarga resultó de 17.5 [PSI], mediante la ecuación 2.34 y el volumen del tanque resultó ser de 0.403 galones usando la ecuación 2.35.

DESCRIPCIÓN	CAPACIDAD		CONEXIÓN (PULGADAS)	DIÁMETRO (MM)	H (ALTURA CON BASE) MM	PESO (KG)	MODELO	NO. DE PARTE
	LITROS	GALONES						
HORIZONTAL	35	8	1" NPT	353	353	7.8	FPS-35LH	313008101
	60	15		424	424	11.51	FPS-60LH	313009101
	80	20		424	424	16.22	FPS-80LH	313011101
	100	26		475	475	19.84	FPS-100LH	313010101

Figura 2.12: Tanques hidroneumáticos FPS disponibles para la venta.



Figura 2.13: Tanque hidroneumático horizontal FPS.

Por lo tanto, el tanque hidroneumático que se seleccionó de catálogo es el que se muestra en la Figura 2.13 con capacidad de 8 galones (FPS-35LH según la Figura 2.12) y presión de precarga de 28 [PSI] de fábrica; cuyo valor se puede disminuir liberando la presión del aire.

La constante “Kp” de la planta se la determinó, partiendo de la ley de Boyle Marotte; la cual es válida suponiendo que la temperatura del aire en el interior del tanque es invariante; lo cual deriva en la ecuación 2.36.

$$P_1V_{g1} = P_2V_{g2} \quad (2.36)$$

Conociendo los datos de fábrica del tanque y considerando que la presión P<sub>2</sub> es 150 [PSI] como máximo; se encontró en dichas condiciones el volumen que ocuparía el aire en el tanque, siendo:

$$V_{g2} = 4.083 [L]$$

Con las ecuaciones 2.2 y 2.3 se obtuvo la ecuación 2.37 de la planta donde se relaciona la presión del aire comprimido con el volumen de llenado del tanque, como se muestra:

$$p(t) = \frac{nRT}{\beta} V(t) \quad (2.37)$$

Se concluye que:

$$\frac{nRT}{\beta} = K_p \quad (2.38)$$

Finalmente, con la ecuación 2.39; se calculó el volumen de llenado, tal que la presión de aire es de 150 [PSI]. Con esto el volumen de llenado es de 31.917 [L] y de esta forma la constante Kp, se pudo calcular con la ecuación 2.38; obteniéndose como valor 4.85 [PSI/L].

$$V_t = V(t) + V_g(t) \quad (2.39)$$

## 2.4 Diseño del variador de frecuencia del sistema en Simulink.

Para la elaboración de un variador de frecuencia operando con un control escalar, es necesario tomar como guía el regulador de presión de la sección 1.4.8. El funcionamiento del variador de frecuencia fue organizado en dos partes:

- Control y generación de pulsos PWM y SPWM.
- Electrónica de potencia.

### 2.4.1 Control y generación de pulsos PWM y SPWM.

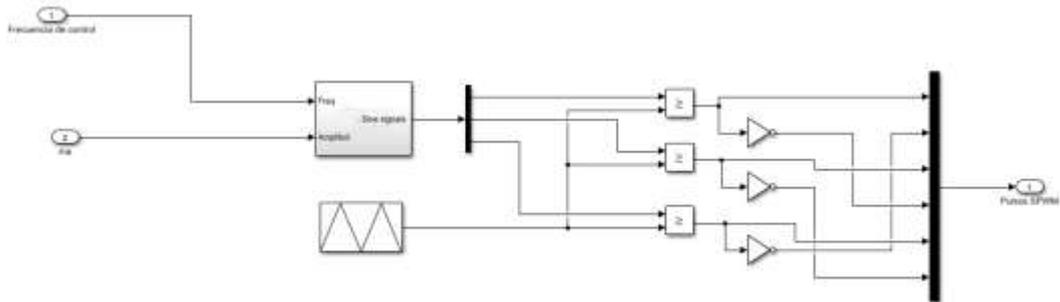
Los pulsos PWM y SPWM fueron elaborados a partir de los componentes de la librería de Simulink.

Los pulsos SPWM, son controlados por el bloque de funciones que se muestra a continuación en la siguiente Figura 2.14; por medio de dos señales de entrada: frecuencia de control y el índice de modulación ( $m_a$ ); generando un bus de 6 señales de salida (Pulsos SPWM).



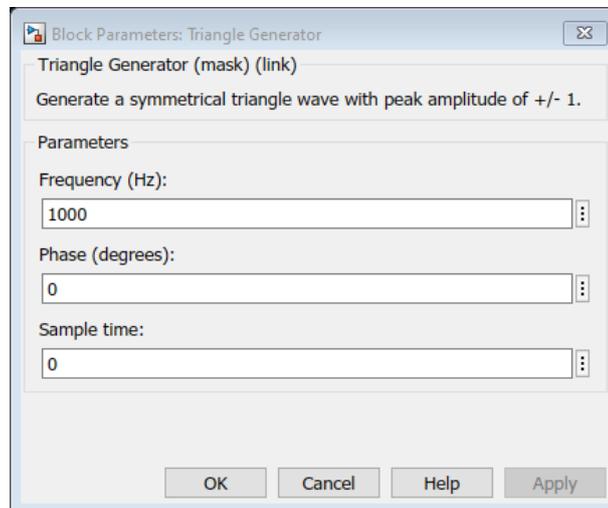
Figura 2.14: Bloque generador de pulsos SPWM

Internamente la Figura 2.15, muestra la construcción del bloque; en donde se muestran los principales elementos que se incluyeron: función triangular, subsistema de generación de señales tipo senos y un sistema de comparación.



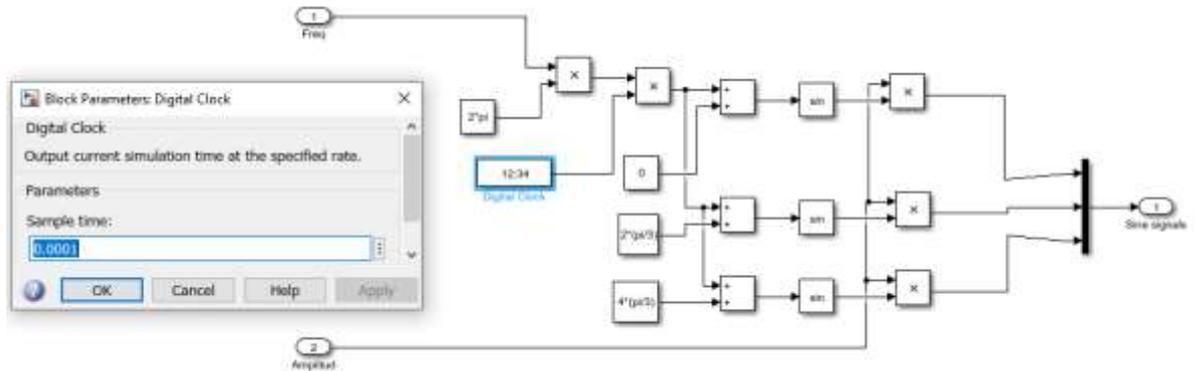
**Figura 2.15: Configuraciones internas del bloque generador de pulsos SPWM**

La señal triangular o portadora es configurada según la Figura 2.16; donde se estableció una frecuencia de 1KHz.



**Figura 2.16: Parámetros de configuración señal triangular**

El subsistema de generación de señales tipo senos fue elaborado internamente como se muestra en la Figura 2.17. Las señales tipos seno, están desfasadas 120 grados entre sí; además se definen su amplitud y frecuencia con las entradas: índice de modulación (Amplitud) y frecuencia de control (Freq).



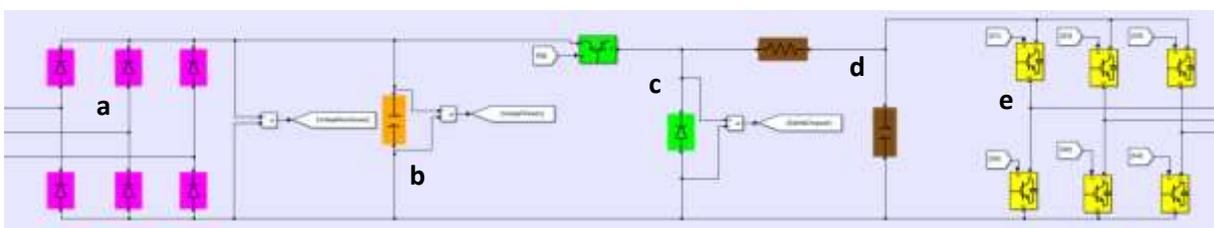
**Figura 2.17: Generador de señales sinusoidales**

### 2.4.2 Etapa de Potencia.

La elaboración de esta etapa se desarrolló utilizando los componentes de la librería “Electrical” de Simscape. La construcción fue elaborada en etapas como se indicó en la sección 1.4.6; además se incorporó un troceador de clase A para variar el voltaje del inversor y un filtro pasivo RC pasa bajos.

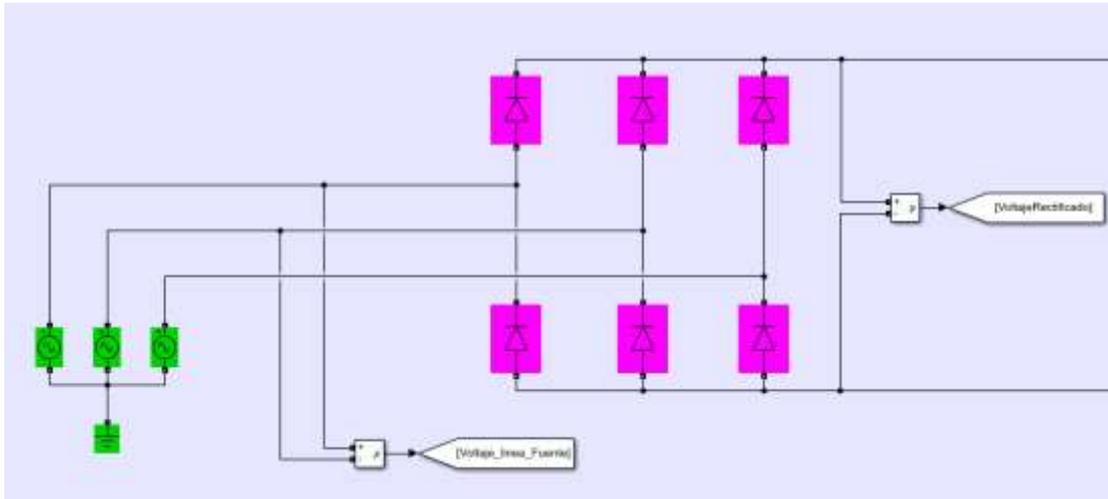
A continuación, en la Figura 2.18, se muestra la disposición del circuito electrónico de potencia en Simulink, por etapas:

- Rectificador trifásico de onda completa no controlado.
- Filtro capacitivo.
- Troceador de clase A.
- Filtro Pasivo.
- Inversor trifásico.



**Figura 2.18: Topología de la Electrónica de Potencia de un VDF.**

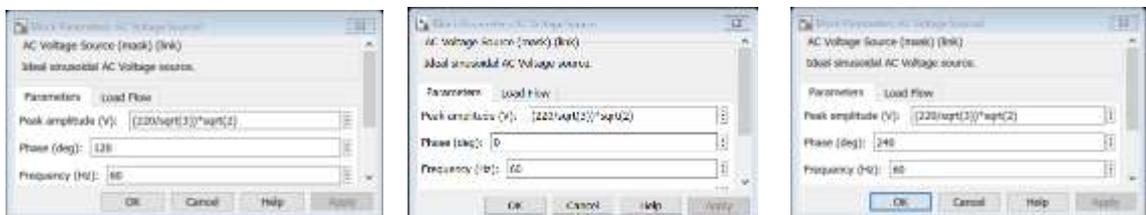
La primera parte, comprende un rectificador trifásico de onda completa no controlado elaborado con 6 diodos y conectado a una fuente trifásica, como se muestra en la Figura 2.19.



**Figura 2.19: Estructura interna del bloque generador de pulsos**

La red de alimentación (físicamente no es parte del VDF), se construyó con 3 fuentes AC, la cuales, se disponen en estrella con neutro aterrizado y se configuraron respectivamente como se muestra en la Figura 2.20; desfasadas 120 grados, 60 Hz y un voltaje de línea de 220 Vrms.

La siguiente etapa corresponde a un filtro; el cual, se dispuso de un elemento “*Series RLC Branch*” como un ramal capacitivo (Figura 2.21) de 1uF.



**Figura 2.20: Configuración de las fuentes de alimentación**



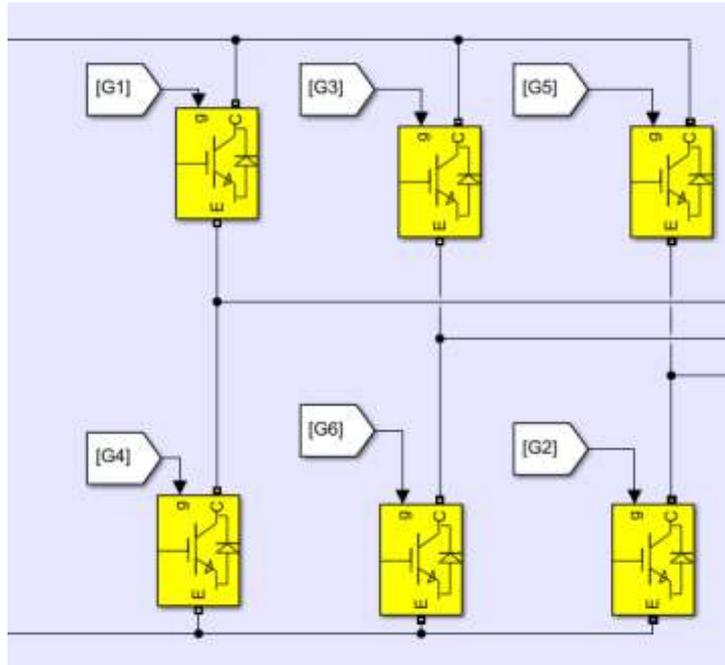


Figura 2.23: Sección del inversor trifásico en el circuito.

## 2.5 Diseño del sistema en lazo cerrado

Se diseñaron dos sistemas de lazo cerrado: lineal y real (no lineal). El primero fue elaborado a partir de las funciones de transferencia desarrolladas durante el modelamiento; mientras que, para el segundo sistema, se incluyó como actuador al variador de frecuencia que se realizó previamente en la sección 2.4 en conjunto con el motor asíncrono de la librería Simscape.

### 2.5.1 Diseño del sistema lineal en Simulink

Primero se elaboró un script en Matlab (Ver Anexos), donde se definieron las variables que intervinieron en la modelación para poder ser usadas en los bloques de Simulink. Se creó la función de transferencia de lazo abierto y se invocó la herramienta SISOTOOL para encontrar un controlador que cumpla con las siguientes especificaciones de diseño: sobre nivel porcentual no mayor al 10%, una estabilización no mayor a 30 segundos y un error de estado estacionario igual a cero (Ver Figura 2.24).

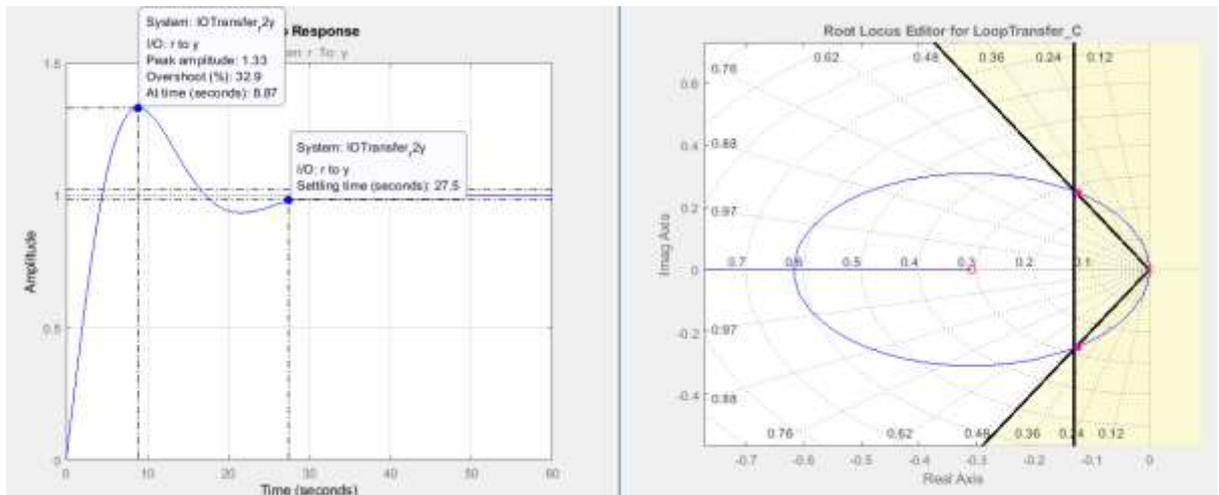


Figura 2.24: Diseño del controlador con la herramienta Sisotool

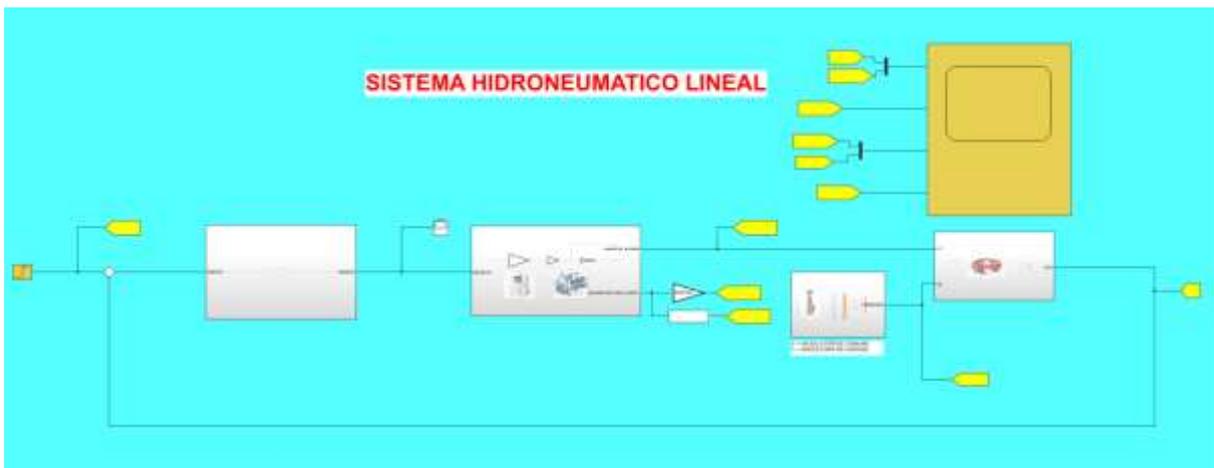


Figura 2.25: Diagrama de bloques del sistema lineal en lazo cerrado

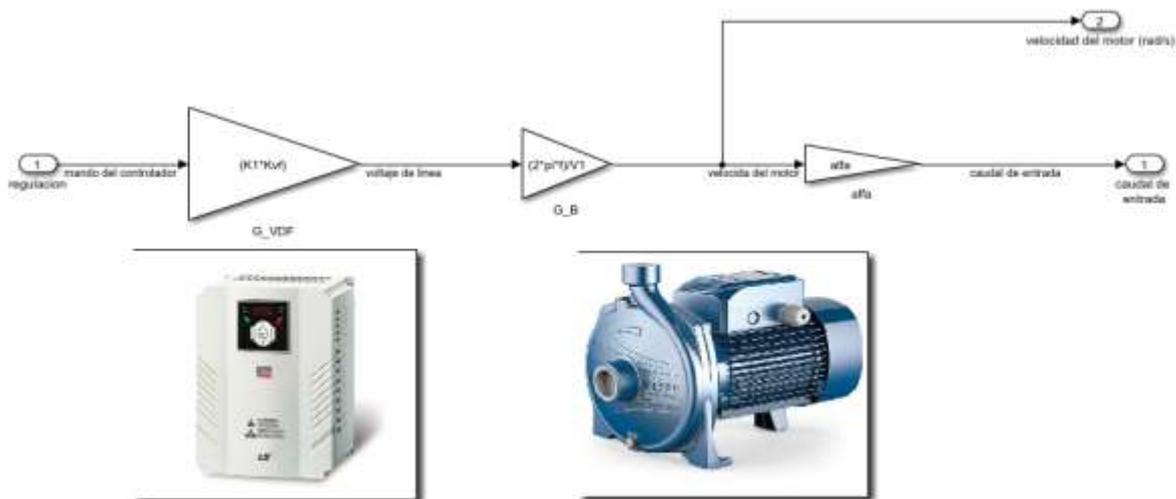
Seguendo el esquema de la Figura 2.1, se realizó un diagrama de bloques con funciones de transferencia y ganancias en Simulink, tal como se muestra en la Figura 2.25; donde la señal de referencia se conforma por una función tipo paso (STEP).

El bloque del controlador PI (Figura 2.26), se configuró con las ganancias proporcionales "P" e integrales "I", de tal manera como se explicó en la sección 1.4.2. En la pestaña *Output saturation*, se habilitó la opción de saturación, de tal manera que se regule del 100% a -100%



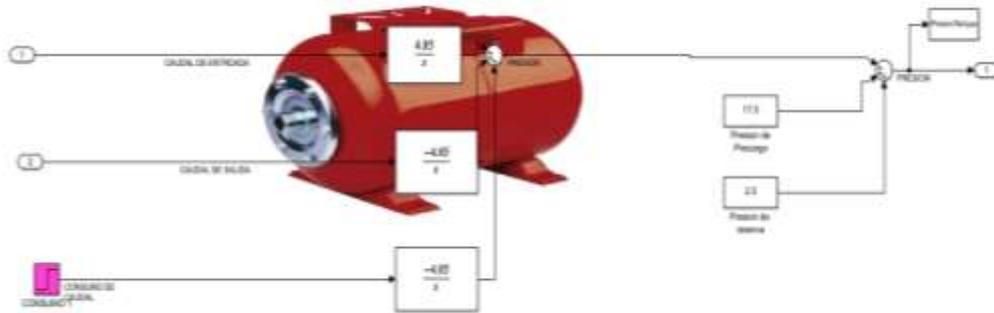
**Figura 2.26: Bloque controlador PI**

El bloque actuador se armó en dos partes; siendo el primero el VDF, el cual, se representó como una ganancia expresada en la ecuación 2.12 adquirida en el modelamiento; y la segunda parte, consiste en la ganancia del motor de la bomba expresada por la ecuación 2.30 (Ver Figura 2.27)



**Figura 2.27: Bloque Actuador lineal.**

Para la elaboración del bloque de la planta, se usaron las ecuaciones 2.6 y 2.7, la cuales representan las funciones de transferencia del sistema hidroneumático; de tal manera que se implementó en Simulink, tomando una superposición de eventualidades, como se muestra en la Figura 2.28.



**Figura 2.28: Bloque de la planta hidroneumática.**

Por último, se programó un bloque que genere los cambios en las variaciones de consumo en [L/min] como se muestra en la Figura 2.29; además de una salida de caudal constante.



**Figura 2.29: Bloque de generación de cambios en el consumo**

## 2.5.2 Diseño del sistema no lineal en Simulink

Se creó el subsistema de la Figura 2.30, en donde está insertado todo el sistema de actuación (VDF y la bomba). Este sistema de actuación no lineal fue diseñado de tal manera que trabaje con las señales de regulación manejadas con valores del 0 al 1 que serían proporcionados por el controlador y así poder permitir el llenado del tanque.

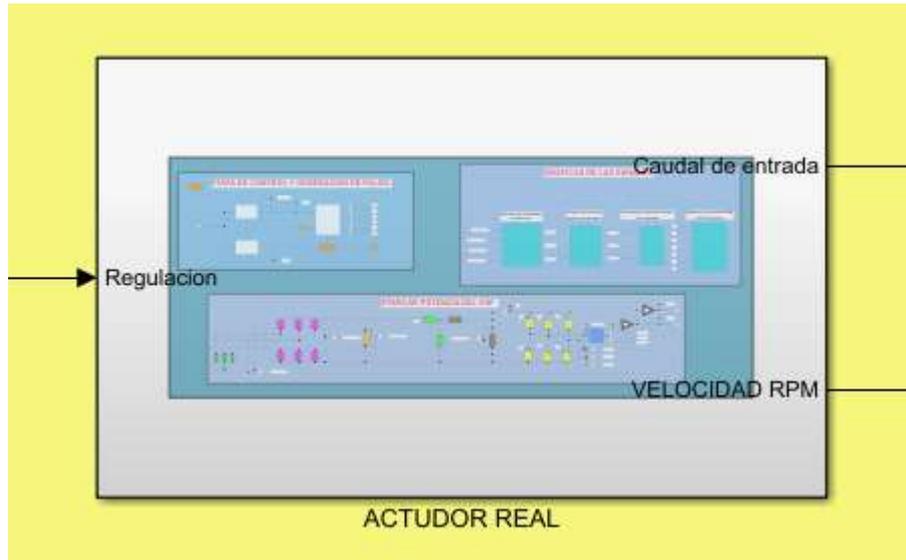


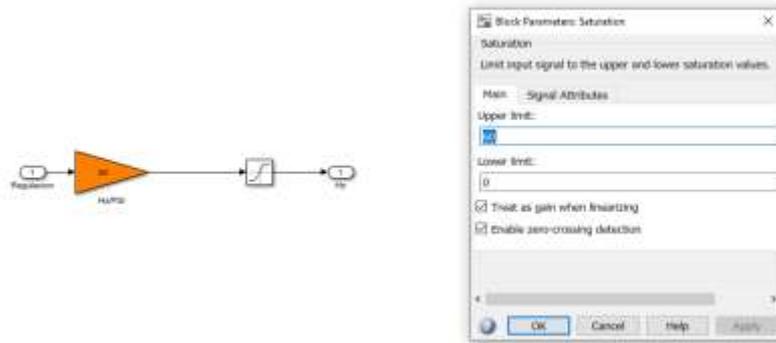
Figura 2.30: Actuador no lineal

En el interior del actuador se armó un generador de seis pulsos para el inversor trifásico, usando la metodología de modulación SPWM; así como también, los pulso PWM para manejar la magnitud del voltaje a través del troceador (Figura 2.31).

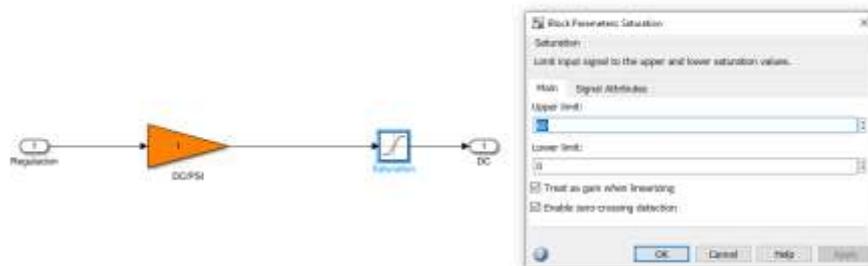


Figura 2.31: Etapa de Generación de pulsos.

Parte de la metodología es también aplicar un control escalar, también conocido como control V/f; para lo cual, se implementaron dos bloques: uno de regulación de frecuencia hacia la entrada del motor de la bomba y otro para regular el ciclo de trabajo; de tal forma como se muestran en las Figuras 2.32 y 2.33, respectivamente.



**Figura 2.32: Regulación de la frecuencia de entrada del motor.**



**Figura 2.33: Regulación del ciclo de trabajo**

La bomba motorizada, fue simulada con una máquina asíncrona provista por la librería “*Machines*” de Simscape; la cual, fue parametrizada con los datos que se especifican en la Figura 2.34. Aquellos datos de la bomba fueron mencionados en la sección 2.2 y otros como el par mecánico fueron obtenidos como se muestra a continuación:

$$T_m = \frac{P}{\omega_m}$$

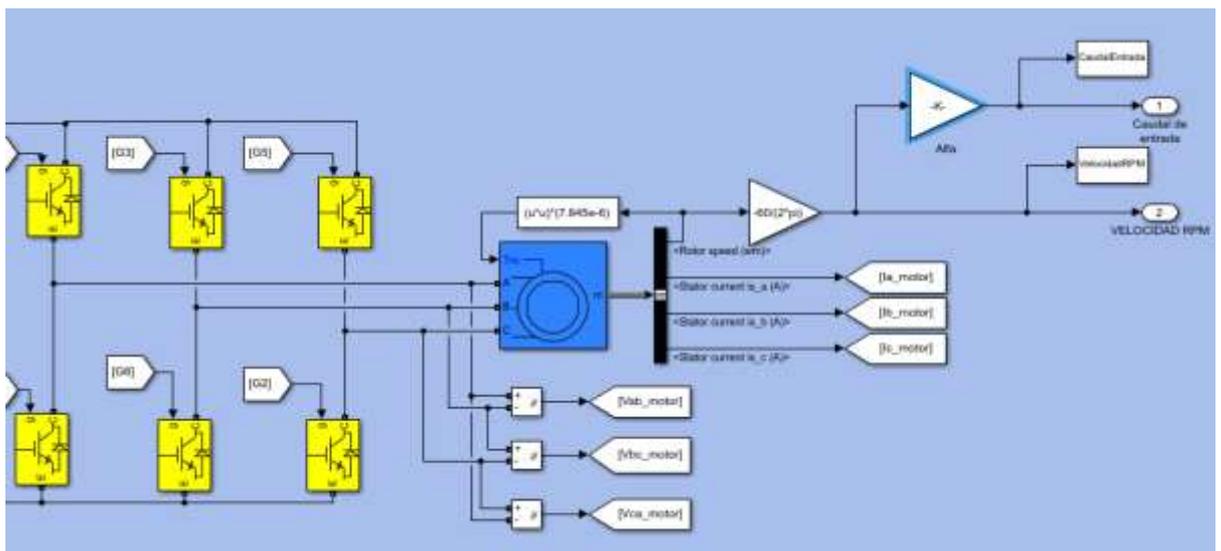
$$T_m = \frac{370}{3450 \text{ rpm} * (2\pi/60)}$$

$$T_m = 1.024 [N * m]$$

Specifications		Block Parameters	
Preset: <input type="text"/>		Nominal power, voltage (line-line), and frequency:	
Nominal line-to-line rms voltage	Vn (V) <input type="text" value="220"/>	<input type="text" value="[370 220 60]"/>	
Nominal frequency	fn (Hz) <input type="text" value="60"/>	Stator resistance and inductance [ Rs(ohm) Lls(H) ]:	
Nominal (full load) line current	In (A) <input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="[2.726 0.01404]"/>	
Nominal (full load) mechanical torque	Tn (N.m) <input type="text" value="1.024"/>	Cage 1 resistance and inductance [ Rr1' (ohm) Llr1' (H) ]:	
Synchronous speed	Ns (rpm) <input type="text" value="3600"/>	<input type="text" value="[5.451 0.03088]"/>	
Nominal (full load) mechanical speed	Nn (rpm) <input type="text" value="3450"/>	Cage 2 resistance and inductance [ Rr2' (ohm) Llr2' (H) ]:	
Starting current to nominal current ratio	Ist/In <input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="[32.71 0.01404]"/>	
Starting torque to full load torque ratio	Tst/Tn <input type="text" value="0.0"/>	Mutual inductance Lm (H):	
Breakdown torque to full load torque ratio	Tbr/Tn <input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.2808"/>	
Nominal power factor	pf (%) <input type="text" value="80"/>	Pole pairs:	
<input type="button" value="Compute block parameters"/>		<input type="text" value="1"/>	
		<input type="button" value="Save spec to MATLAB structure"/>	
		<input type="button" value="Apply to selected block"/>	
		<input type="button" value="Help"/>	
		<input type="button" value="Close"/>	

**Figura 2.34: Configuración parámetros del motor de la bomba**

El motor de la bomba es conectado a la salida del inversor (salida del VDF). El bloque del motor asíncrono tiene una salida de tipo bus, como se muestra en la Figura 2.35, de donde se extraen las señales de corriente de línea y además la señal de la velocidad mecánica en rad/s, razón por la cual, se multiplica por una ganancia de  $(60/2\pi)$  para mostrar en unidades de rpm. Además, se implementó la ganancia  $\alpha$  para definir el caudal de llenada en el tanque hidroneumático.



**Figura 2.35: Sección del motor y conexión con el inversor**

## 2.6 Sintonización del controlador y simulación en Simulink

Se realizaron simulaciones en el sistema lineal y real, tomando en cuenta lo siguiente:

- Presión de referencia 25 [PSI]
- Caudal máximo suministrado por la bomba 20 L/min según la curva característica; pero se trabajará hasta un suministro de bombeo máximo de 19 L/min ( $Q_{iss}$ )
- Caudal de suministro ( $Q_{oss}$ ) 16.15 [L/min] (85% de  $Q_{iss}$ )
- Caudal de alivio 2.85 [L/min] (15% de  $Q_{iss}$ )
- Variaciones de consumo de 1[L/min] con periodo de 5 a 10 segundos.
- Se requiere como máximo: 10% de OS y 30 [s] de estabilización.
- Se configura un  $\alpha = 20/3450$  [L/rev]; según la curva característica de la bomba CP600.

Se empezó simulando el sistema lineal con el PI que se obtuvo a través de la herramienta Sisotool de Matlab. Para el caso del sistema real, se tomó la opción de sintonizar un controlador a partir del PI obtenido en Sisotool; pero también fue válido aplicar una metodología propia de los conceptos básicos de los sistemas de control; es decir, la sintonización de un controlador PID mediante la asignación de polos de lazo cerrado (Mazzone, Controladores PID, 2002, p. 7).

Para esto se consideró la función de transferencia de la planta (ecuación 2.6) y un controlador PID como se muestra en la ecuación 2.40; la cual, al resolverla, es equivalente a la expresión mostrada en la ecuación 2.41 (Mazzone, Controladores PID, Control Automático, p. 9).

$$G_c(s) = P + \frac{I}{S} + \frac{Ds}{\zeta_D S + 1} \quad (2.40)$$

$$G_c(s) = \frac{n_2 S^2 + n_1 S + n_0}{d_2 S^2 + d_1} \quad (2.41)$$

Debido a la equivalencia entre las ecuaciones 2.40 y 2.41, se obtuvieron las siguientes expresiones para hallar ganancias del PID:

$$P = \frac{n_1 d_1 - n_0}{d_1^2} \quad (2.42)$$

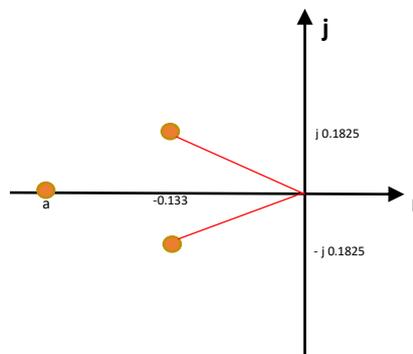
$$I = \frac{n_0}{d_1} \quad (2.43)$$

$$D = \frac{n_2 d_1^2 + n_1 d_1 d_2 + n_0 d_2^2}{d_1^3} \quad (2.44)$$

La expresión mostrada en la ecuación 2.45; hace referencia a un filtro derivativo de primer orden según (Mazzone, Controladores PID, Control Automático, p. 9); el cual, también es usado en bloque PID de Simulink (Ver Figura 2.26).

$$\zeta_d(s) = \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{N} \quad (2.45)$$

Utilizando las especificaciones de diseño del sobrenivel porcentual (máximo 10%) y tiempo de estabilización (máximo 30 [s]); se obtuvieron los polos dominantes de lazo cerrado del sistema en el lugar geométrico de las raíces, como se muestra en la Figura 2.36.



**Figura 2.36: Ubicación de los polos dominantes del sistema en lazo cerrado.**

$$A_{cl}(s) = (s^2 + 0.266s + 0.051)(s + a) \quad (2.46)$$

De esta manera, la función de los polos en lazo cerrado se muestra en la ecuación 2.46 y se desarrolla un sistema ecuaciones para poder hallar los parámetros del controlador PID a través de la definición de una función de transferencia de lazo cerrado de la Figura 2.1; cuyo denominador es igual a la ecuación 2.46 (Ver ecuación 2.47).

$$A_{cl}(s) = d_2s^3 + [d_1 + 4.85n_2]s^2 + 4.85n_1s + 4.85n_0 \quad (2.47)$$

Se igualan las ecuaciones 2.46 y 2.47; lo que permite obtener las expresiones para encontrar los coeficientes de la función de transferencia expresada en la ecuación 2.41. Se obtuvieron las siguientes expresiones.

$$d_2 = 1 \quad (2.48)$$

$$d_1 = N \quad (2.49)$$

$$n_0 = \frac{0.051a}{4.85} \quad (2.50)$$

$$n_1 = \frac{0.051 + 0.266a}{4.85} \quad (2.51)$$

$$n_2 = \frac{0.266 + a - N}{4.85} \quad (2.52)$$

Se tomó en cuenta que Simulink trabaja por defecto con  $N = 100$ ; además se considera que las ganancias del PID deben de ser positivas; es decir, mayores a cero; lo cual permite trabajar con las ecuaciones 2.42, 2.43 y 2.44 en un sistema de desigualdades; de tal manera, que se pueda hallar el intervalo de la magnitud del tercer polo de lazo cerrado “a” (Ver Figura 2.36) que pueda satisfacer de manera simultánea las condiciones de las ganancias precisadas. Resolviendo, se obtiene que la magnitud del tercer polo tiene que ser mayor a 102.45.

Se escribió en un Script de Matlab todas las expresiones que se muestran en la Figura 2.37; con la finalidad de encontrar de manera rápida las ganancias del PID según los valores de la magnitud del tercer polo. Para un polo

ubicado en -1200; los parámetros del controlador PID se muestran en la Figura 2.38.

```

%% SINTONIZACION DEL PID POR ASIGNACION DE POLOS
% filtro derivativo otorgado por simulink
N = 100;
a = 1200;
d1 = N;
d2 = 1;
n0 = (0.051*a)/4.85;
n1 = (0.051+(0.266*a))/4.85;
n2 = (0.266+a-d1)/4.85;

P = ((n1*d1) - (n0*d2)) / d1^2
I = n0/d1
D = ((n2*d1^2) - (n1*d1*d2) + (n0*d2^2)) / (d1^3)

```

**Figura 2.37: Script en Matlab para calcular los parámetros del PID**

P =	I =	D =
0.6570	0.1262	2.2620

**Figura 2.38: Ganancias de PID determinadas por asignación de polos**

Con los parámetros hallados de la Figura 2.38 se simula el sistema real implementado en Simulink.

# CAPÍTULO 3

## 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Resultados de la simulación del sistema lineal

La presión de la variable de proceso (presión del tanque hidroneumático), siguió a la presión de trabajo, que fue establecida como 25 PSI ante una configuración de parámetros PI que fueron encontrados por Sisotool y resultaron con ganancias de 1.7080 para el proporcional y 0.5384 de ganancia integral. Los parámetros en la transición del sistema de lazo cerrado fueron obtenidos como 6.026 [s] de tiempo de estabilización y 0% de sobrenivel porcentual; lo cual, es una dinámica favorable que no comprometería a daños en las tuberías, tanque hidroneumático y al conjunto actuador (Ver Figura 3.1).

Se observa además en la Figura 3.1, la relación lineal entre la velocidad del motor de la bomba y el caudal que éste suministra a la planta, el cual resultó ser de 19 [L/min]; además de considerar que 2.85 [L/min] son extraídos como retorno al hacia el depósito, a través de una válvula de alivio. Bajo estas condiciones; se obtuvo que el motor de la bomba necesita una potencia de 317.2 [W] y una velocidad de giro de 3278 [rpm].

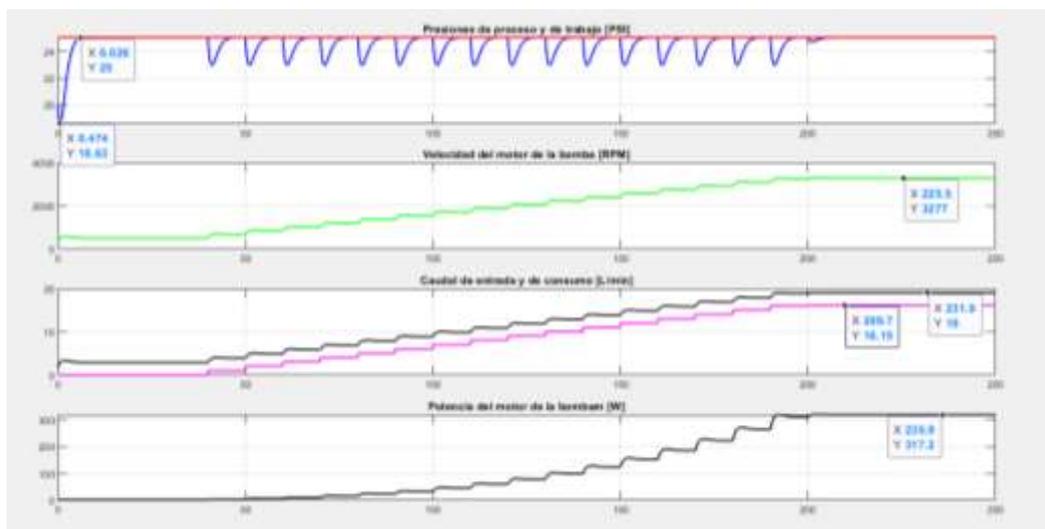
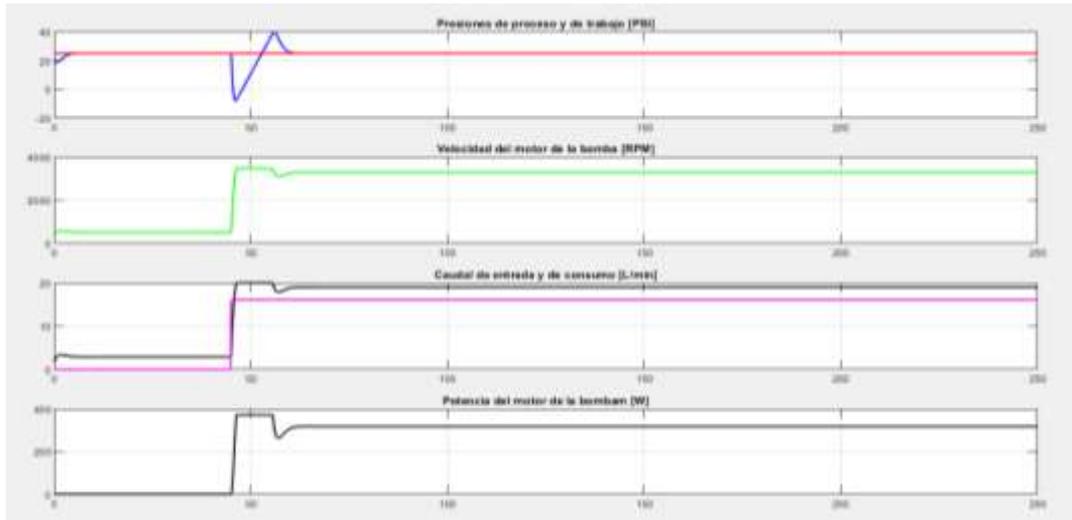


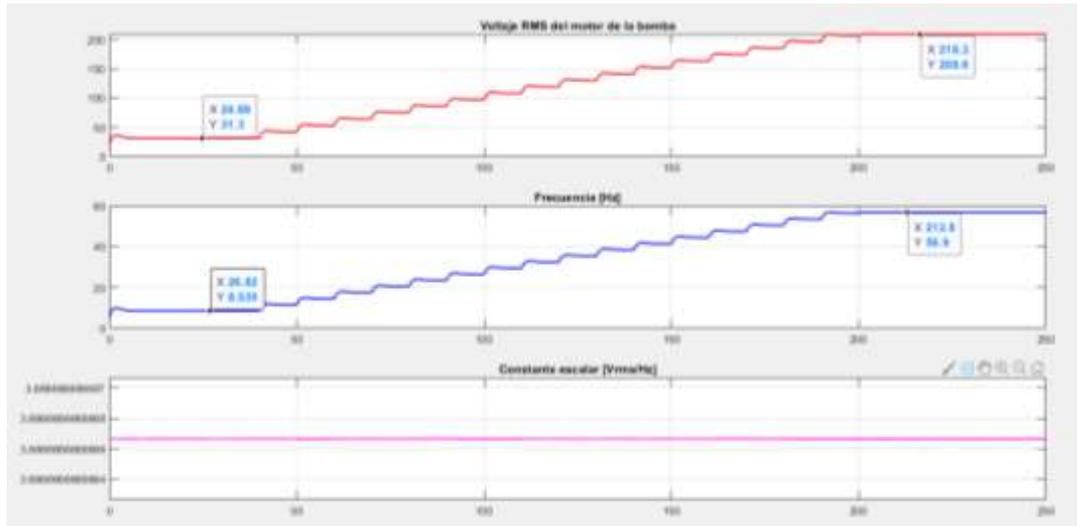
Figura 3.1: Gráficas de los resultados del sistema lineal con  $\alpha = 20/3450$  L/rev.

El sistema de presión constante linealizado mostró ser sensible ante las variaciones bruscas de consumo, generando considerables caídas de presión mostradas en la Figura 3.2; donde se demuestra que, para este sistema se deben realizar cambios de consumo pequeños hasta alcanzar el consumo de trabajo.



**Figura 3.2: Gráficas de los resultados del sistema lineal con variaciones bruscas de consumo.**

También se obtuvieron las gráficas de voltaje RMS del motor de la bomba, frecuencia y por ende la constante  $V/f$ . La Figura 3.3, muestra que para suministrar 16.15 [L/min], la bomba debe ser actuada a 56.9 [Hz] y 208.6 [Vrms]. La constante  $V/f$  se mantuvo invariante en 3.66 [Vrms/Hz] durante todo el proceso, lo que sugiere, que el control escalar está bien aplicado y por lo que no saturaría el entrehierro del motor de la bomba.



**Figura 3.3: Gráfica del control escalar aplicado al sistema lineal.**

Se calculó la eficiencia ideal del proceso, partiendo que no se conocen los parámetros internos de la máquina; sin embargo, con los resultados de la velocidad de bombeo obtenida en la Figura 3.1 (3277 [rpm]) y conociendo que el motor sería de dos polos trabajando a una frecuencia de 56.9 Hz, resulta en una velocidad de campo giratorio 3414 [rpm], consiguiendo un deslizamiento de 0.039. Por lo cual, al aplicar la ecuación 1.4, se tiene como 96% de eficiencia ideal referente al motor de la bomba.

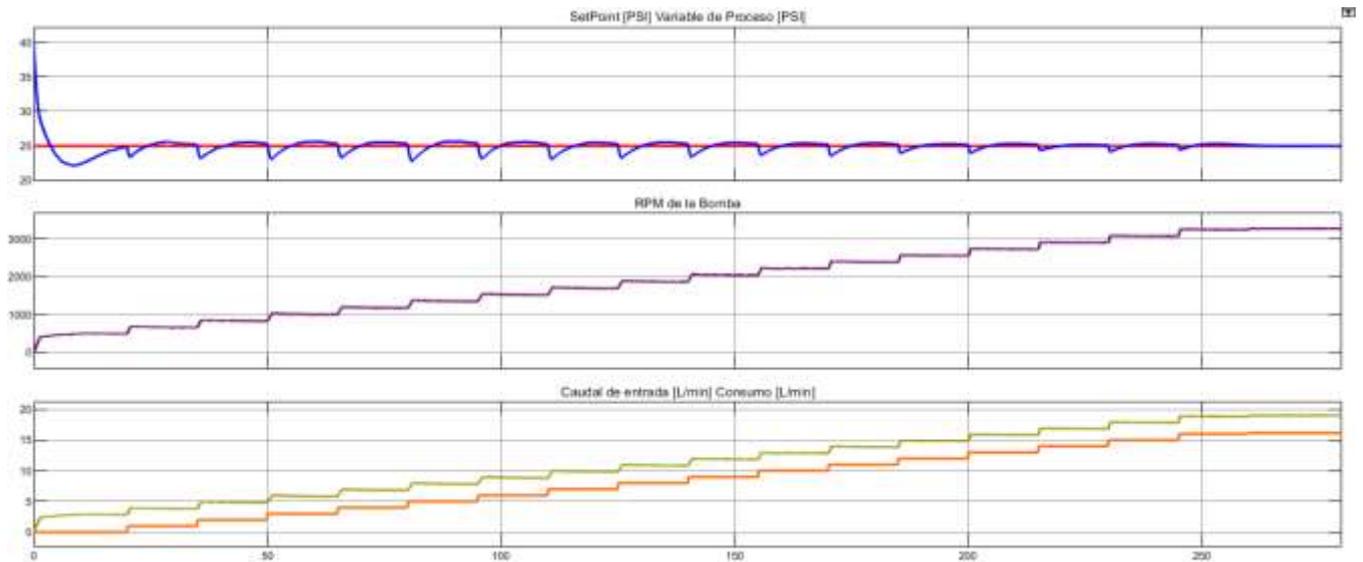
La tabla 3.1 muestra la eficiencia ideal total obtenida de todo sistema eléctrico que comprende el sistema linealizado; partiendo del hecho que los variadores de frecuencia modernos son un 95% eficientes.

Alfa [L/rev]	Eficiencia ideal del motor de la bomba	Eficiencia de un variador de frecuencia moderno	Eficiencia eléctrica ideal total del sistema eléctrico
20/3450	96.03%	95%	91.22%

**Tabla 3.1 Eficiencias del sistema lineal en función del ajuste del  $\alpha = 20/3450$  L/rev**

### 3.2 Resultados de la simulación del sistema real.

Se obtuvo las gráficas que se muestran en la Figura 3.4; donde la variable de proceso comienza desde una presión inicial de 40 [PSI], con el propósito de evitar que la caída de presión sea menor a la presión de precarga (17.5[PSI]). Se midió el tiempo de estabilización y la máxima caída de presión, resultando esta última en 22.7 [PSI]. Con esto se realizó la Tabla 3.2, donde se adjuntan los parámetros de transición de la variable de medición.



**Figura 3.4: Gráficas de los resultados del sistema real con  $\alpha= 20/3450$  [L/rev].**

Porcentaje de máxima caída de presión	Tiempo de estabilización
15.33%	20 [s]

**Tabla 3.2 Parámetros de transición de la variable de proceso del sistema real.**

Se puede afirmar que la dinámica del proceso es muy aceptable desde el punto de vista de rapidez de respuesta; pues, el sistema ha cumplido con dicha expectativa de diseño, aunque no en el máximo valor de variación de presión (undershoot); debido a que, en la metodología utilizada, no fue

posible considerar los efectos en la presión ocasionados por el caudal de consumo ni por el caudal de alivio. Esto produjo aproximadamente aquel 5.33% de diferencia de undershoot que se muestra en la Tabla 3.2 con respecto a al 10% de variación máxima que fue especificado; lo cual indica que la presión tiene mayor influencia por el suministro de bombeo. La Figura 3.4 muestra que el sistema tiende a estabilizarse en los 25 [PSI], por lo que el error en estado permanente es nulo por efecto del integrador.

Para alcanzar el consumo deseado se realizaron 16 pasos (1 L/min por paso) entre 15 segundos cada uno, debido a que el sistema presentó caídas de presión muy por debajo de la presión de precarga; lo cual no es aceptable porque el tanque estaría tratando de retornar el agua hacia la bomba como efecto de expansión del diafragma.

La Figura 3.4 también revela que se tuvo un correcto control sobre el sistema de actuación; teniendo una respuesta suavizada y libre de oscilaciones. Se midió la potencia que consume el motor de la bomba, obteniendo en estado permanente de operación 317.3 [W], girando a 3277 [rpm].

A través de un Análisis FFT de Simulink (Ver Anexo D), se realizaron las mediciones de armónicos del motor de la bomba como se muestran en las Figuras D.1 y D.2. En régimen permanente el THDi resultó ser de 44.10%; lo cual se considera dentro de un rango aceptable, según los estándares de la IEC (Electric, p. 417); pero se debe realizar una correcta instalación de protecciones térmicas. Mientras que, el THDv es de 124.30%, lo cual es demasiado alto; esto se debe a que no se ha implementado filtros que normalmente están embebidos en un variador de frecuencia moderno, además la técnica de modulación incorpora etapas de PWM asíncrono, causantes de se inserten armónicos de baja frecuencias cercanas a la componente DC; lo cual, también termina influyendo en la generación de armónicos en la corriente del motor.

Voltaje de línea del motor de la bomba	Corriente de línea del motor de la bomba	%THDi	%THDv
111.4 Vrms	3.212 Arms	44.10%	124.30%

**Tabla 3.3: Resultados del análisis de FFT para corriente y voltaje**

Para estimar la eficiencia energética (tipo eléctrica), se usaron como apoyo las Figuras 1.9 y 1.11; que muestran la relación que tienen la eficiencia y el factor de potencia de un motor asíncrono con respecto a la velocidad de giro. Además, se consideró como hecho, la eficiencia que normalmente presentan los variadores de frecuencia modernos que rondan por el 95% en promedio. A partir de los datos de corriente y voltaje de la Tabla 3.3, se pudo estimar la potencia eléctrica trifásica que se suministra al motor de la bomba.

Factor de potencia aproximada	Potencia eléctrica de entrada del motor	Potencia mecánica útil del motor	Eficiencia real del motor	Eficiencia de un variador de frecuencia moderno	Eficiencia eléctrica real total.
0.75	464.81 [W]	317.3 [W]	68.26%	95%	64.85%

**Tabla 3.4: Potencias y eficiencias medidas**

La eficiencia resultó ser baja, lo cual sugiere que la velocidad en la que se está operando no es la indicada para el suministro solicitado. Para esto se debería disminuir el punto de operación de suministro de la bomba a un valor un poco más bajo, de tal forma que la velocidad sea un poco más próxima a la nominal y de esa mejore también el factor de potencia.

En los anexos A y B se muestran las gráficas obtenidas por la metodología de prueba y error; partiendo de los valores de un PI obtenidos por sisotool, resultando en respuestas oscilatorias y poco exactas. Mientras que las Figuras C.1 y C.2 del Anexo C, resultaron de la sintonización de un PID por prueba error, obteniendo una respuesta más estable y con un mejor tratamiento sobre el actuador.

### 3.3 Análisis de costos

Para implementar este proyecto en un escenario real, se deben utilizar los distintos elementos mencionados a lo largo del capítulo 2, siendo lo esencial, elegir un variador de frecuencia que incorpore entre sus funciones un controlador PID con esto se reducen costos ya que se evita la adquisición de otro equipo que realice esta función como podría ser también un PLC.

La elección de la bomba de agua va a quedar a criterio de las necesidades que requiera el usuario o empresa, es posible que existan casos donde ya se tenga un sistema manual de regulación de presión por lo cual la bomba sea un elemento que no requiera incluirse en el presupuesto.

Se puede observar en la Tabla 3.5 un presupuesto para la implementación de este sistema en un banco de pruebas para poder parametrizar un controlador.

Número de catálogo	Descripción	Cantidad	Precio por unidad	Precio total
SV008IG5A-4	VFD iG5 (1 HP)	1	\$363.50	\$363.50
MBS1700	Transductor de presión	1	\$150	\$150
SPB-120-24	Fuente conmutada 12V	1	\$110	\$110
Pedrollo ½ HP 24 Litros	Bomba de agua con tanque presurizado	1	\$150	\$150
			<b>Total</b>	<b>\$778.5</b>

**Tabla 3.5 Lista de costos de los equipos utilizados**

En la Tabla 3.6 se puede observar un listado de equipos y materiales utilizadas para hacer un sistema un poco más robusto y orientado a industrias que necesiten tener un mejor control y enlace con otros sistemas, por lo cual se propone adicional la implementación de un PLC y una HMI con un sistema SCADA esto también podría permitir que datos del sistema puedan ser

almacenados en alguna nube, dando paso así a una colección de datos que en ocasiones es necesaria para sistemas modernos en la industria 4.0. Cabe recalcar que no se incluye el precio de una bomba o tanque presurizado porque eso dependerá de las necesidades de la empresa que en muchos casos, ya dispone de una.

Número de catálogo	Descripción	Cantidad	Precio por unidad	Precio total
SV008IG5A-4	VFD iG5 (1 HP)	1	\$363.50	\$363.50
ECT 8472	Transductor de presión	1	\$215	\$215
SPB-120-24	Fuente conmutada 12V	1	\$110	\$110
PS307	Fuente salida 24 VDC, 5A	1	\$350	\$350
CPU 1212 AC/DC/Relais	PLC S7-1200	1	\$500	\$500
KTP400 Basic	HMI Siemens	1	\$500	\$500
			<b>Total</b>	<b>\$2038.5</b>

**Tabla 3.6 Lista de costos propuesta**

Para poder determinar que tan rentable es la inversión realizada al implementar este sistema se plantean los siguientes datos para obtener el costo anual de la demanda energética, esto tomando en consideración los elementos que fueron utilizados en el banco de pruebas que realizamos (véase Tabla 3.9 y Anexo C):

- Tarifa de kWh = \$0.09
- Potencia Bomba = 0.37285KW

Si se reduce en un 30% la velocidad del motor se obtiene que la frecuencia de trabajo del motor se reduce de 60Hz a 42Hz, esto en términos de potencia es una reducción al 40% aproximadamente lo cual nos permitiría armar 2 ecuaciones, la ecuación 4.1 donde se determina el costo anual de energía sin utilizar un variador de frecuencia y la ecuación 4.2 donde se determina el costo anual de energía utilizando el variador de frecuencia.

$$\text{Costo Energía}_{\text{Anual}} = 0.37285 * 24 * 0.09 * 365 = \$293.95 \quad 4.1$$

$$\text{Costo con VDF}_{\text{Anual}} = 0.4 * 0.37285 * 24 * 0.09 * 365 = \$117.582 \quad 4.2$$

Finalmente restando los valores obtenidos en las ecuaciones 4.2 y 4.1 se obtiene un ahorro anual de aproximadamente \$176 suponiendo que la bomba utilizada es la que se propone en la Tabla 3.9, la cual es una bomba de baja potencia utilizada para pruebas, en un escenario real las bombas tienen una mayor potencia por lo que el ahorro incrementará de manera considerable.

# CAPÍTULO 4

## 4 Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- A través de Matlab/Simulink se simuló dos sistemas de bombeo a presión constante; uno lineal y otro real, los cuales fueron contrastados y permitieron entender el principio de funcionamiento de estos sistemas de bombeo. Además, con la ayuda de Matlab al usar la herramienta *Sisotool*, se ahorró tiempo en diseñar un controlador PI a través del LGR; lo que convierte a Matlab en un Software útil para el diseño y simulación de procesos industriales linealizados.
- Matlab mediante la simulación, ayudó a tener una idea de cómo el sistema se comportaría en la realidad; lo cual, es muy importante para poder implementarlo con todas las medidas de seguridad y de diseño; de esta manera, se puede proteger los equipos así garantizar una mayor vida útil que se reflejan en ahorros por mantenimientos o por compra de otros equipos y/o repuestos.
- Durante las simulaciones, se evidenció que tanto el modelo lineal y en especial el modelo real, manejan un buen control de la variable de proceso sin importar el consumo de caudal que se requiera. En el caso especial del modelo real, se necesitó implementar un derivativo para poder tener un mejor control sobre el sistema de regulación, ya que con la ausencia del derivativo el sistema se tornaba oscilatorio y nunca se estabilizaba en la presión de referencia.
- Se implementaron dos métodos de sintonización: prueba - error y asociación de polos. Este último resultó ser un método apropiado, porque garantizó con mucha seguridad la ubicación tentativa de los polos de lazo cerrado que permitirían la sintonización directa de un controlador PID.

Mientras que el método de prueba – error, puede ser aceptable en la simulación del sistema; pero, no se recomienda aplicarlo en un sistema en el campo; ya que, esto involucraría detener una línea de producción, costando dinero y tiempo a la empresa y además que se pueden ocasionar daños a los equipos.

- Se consiguió implementar el control escalar (V/f), lo que en teoría garantiza que el flujo del entrehierro no se llegue a saturar, por lo cual se asegura otra razón para disminuir la posibilidad de generar armónicos.
- No se alcanzó la eficiencia pensada, la cual debería haber estado entre el 70% al 80%; en su lugar se obtuvo un 64.85%; lo cual, no es suficiente para garantizar un correcto aprovechamiento de la energía.
- Se obtuvo un análisis de armónicos de corriente aceptable de 44.10 %; mientras que los armónicos de voltaje fueron de 124.30%; tomando en cuenta que no se implementó una programación completa de un variador de frecuencia moderno; es decir, se omitieron los filtros. Los armónicos obtenidos fueron causados por la modulación PWM de tipo asíncrona en determinadas etapas de la simulación; estos armónicos generados cercanos la cero. Se simuló con un índice de modulación igual a 15, lo permitió eliminar los armónicos pares y mitigar el efecto de aquellos armónicos impares y múltiplos de 3.
- El sistema ayuda a reducir considerablemente el gasto de energía para bombas de elevada potencia y que trabajen periodos de tiempo prolongados, el costo de implementación del sistema se recuperaría en unos años permitiendo así tener un ahorro al bolsillo del propietario.
- La reducción del consumo energético además de ser un beneficio a la economía de los propietarios de un sistema de presión hidro-neumático, también contribuye al medio ambiente.

## 4.2 Recomendaciones

- Debido al manejo de corrientes y THDi altos que se pueden dar en el motor como se ha demostrado en este proyecto, se deben usar un grupo de bombas que operen de manera periódica y además se debe diseñar una instalación eléctrica con sus debidas protecciones.
- Utilizar variadores de frecuencia modernos con alta eficiencia, ya que estos llevan integrados filtros que permitirán disminuir los armónicos de corriente /voltaje y mejorarán el rendimiento del proceso. Además, se recomienda utilizar el método de control vectorial para garantizar con más seguridad una mejor eficiencia del actuador eléctrico.
- Implementar un controlador FP7 de la familia de Panasonic, el cual permite trabajar con multi protocolos para utilizar un sistema de monitoreo con HMI/SCADA de manera local, además de permitir realizar monitoreos a grandes distancias geográficas desde la computadora o celular usando Servidores Web.
- Usar un transmisor de presión inteligente con protocolo HART, que permita ser utilizado en una red de comunicaciones, facilitando el monitoreo y permitiendo realizar ajustes y/o configuraciones del dispositivo de manera remota como ventaja del protocolo precitado.
- Implementar el sistema de bombeo presentado en la realidad; realizando las mediciones respectivas de corrientes, voltajes, armónicos, caudales y presión; de tal manera que se realice un contraste con la simulación.
- Si se requiere un sistema de bajo costo, utilizar un variador de frecuencia que entre sus funciones incorpore un controlador PID.

## 5 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Apunte Pin, F. J. (2014). Análisis y Optimización del desperdicio de agua en el área de embotellamiento de cervecería nacional planta pascuales. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- [2] Electric, S. (s.f.). Electrical installation guide.
- [3] FPS. (s.f.). Tanques Hidroneumaticos de diafragma.
- [4] Inteligentes, D. (s.f.). *Desarrollo Inteligentes* . Obtenido de [http://www.webddigital.com/articulos\\_variadores.aspx](http://www.webddigital.com/articulos_variadores.aspx)
- [5] María Baquero, & Felipe Quesada. (2016). Eficiencia Energetica en el Sector residencial de la ciudad de Cuenca. Ecuador. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- [6] Mazzone, V. (s.f.). Controladores PID, Control Automático.
- [7] Mohan, N., Undeland, T., & Robbins, W. (2009). *Electrónica de Potencia Convertidores, aplicaciones y diseño*. México: McGraw Hil.
- [8] Mora, J. F. (s.f.). *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill - Sexta Edición.
- [9] Nidal , S., & Peter H, G. (s.f.). Water Security and Sustainable Development Goals.
- [10] Osejos, A., José , M., Oswaldo , P., & Luz, C. (02 de Mayo de 2018). Análisis del abastecimiento de agua potable de la ciudad de Jipijapa. Jipijapa, Manabí, Ecuador.
- [11] Pedrollo. (s.f.). Catálogo de bombas centrifugas Pedrollo.
- [12] Sen, P. (2012). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Kingston: Wiley.

## 6 ANEXOS

### 6.1 Método de sintonización por prueba y error

#### ANEXO A

Resultados del sistema real cuando  $\alpha=20/3450$  L/rev y 19.65 L/min de suministro de la bomba con PI = [1.7080 0.5384],  $m_a = 0.7$

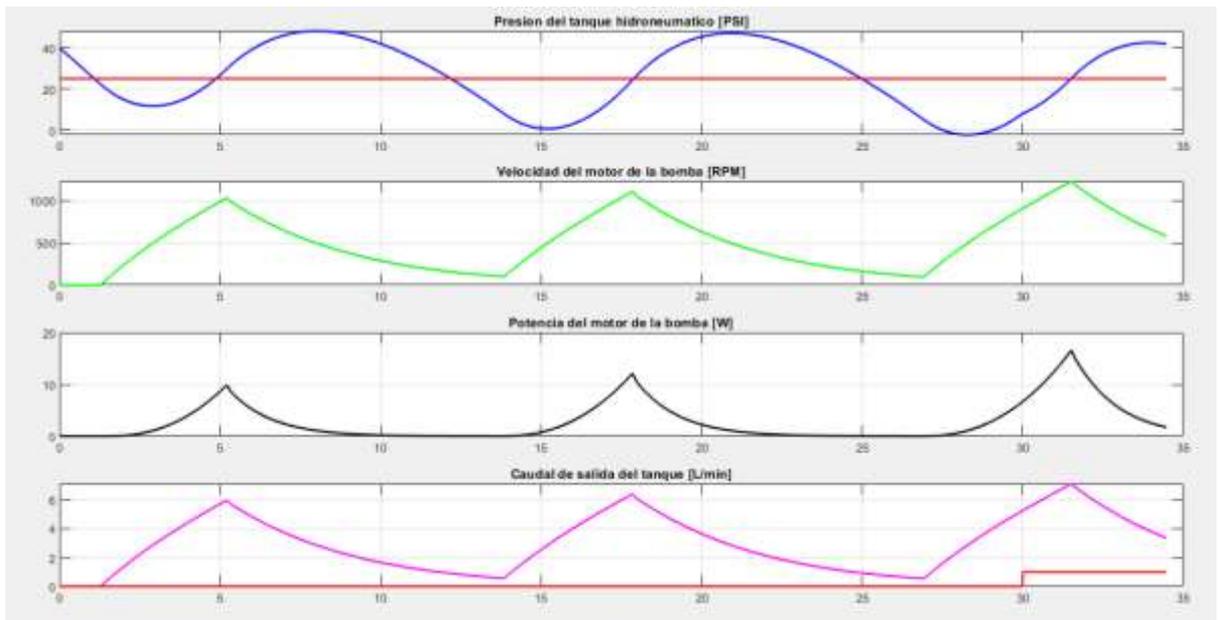


Figure A.1 Resultados de la simulación con PI = [1.7080 0.5384],  $m_a = 0.7$  y  $m_f = 16.66$

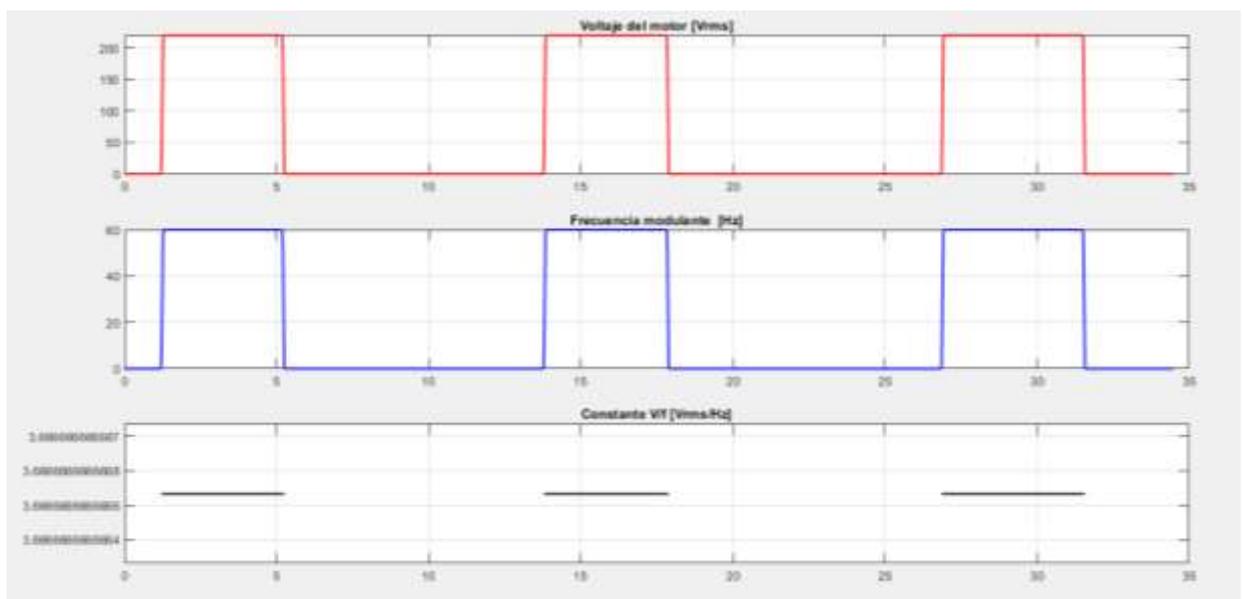


Figure A.2 Resultados de la simulación del control escalar con PI = [1.7080 0.5384],  $m_a = 0.7$  y  $m_f = 16.66$

## ANEXO B

Resultados del sistema real cuando  $\alpha=20/3450$  L/rev y 19.65 L/min de suministro de la bomba con PI = [1.2080 0.001], ma = 0.7

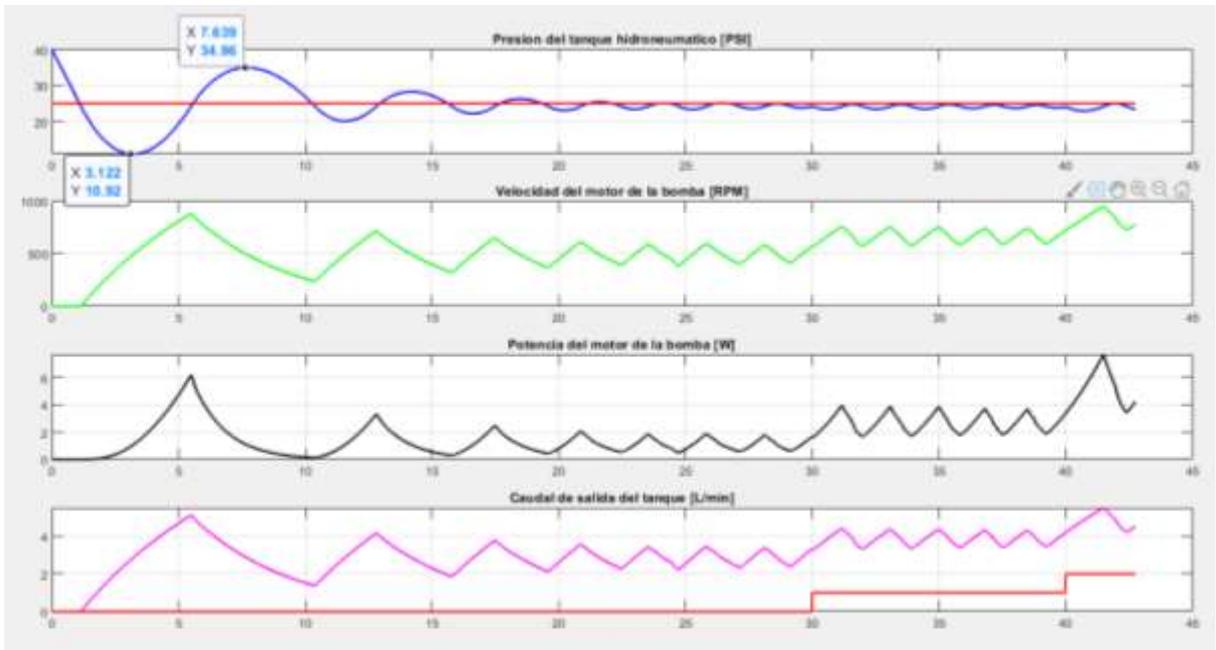


Figura B.1: Resultados de la simulación con PI = [1.2080 0.001], ma = 0.7 y mf = 16.66

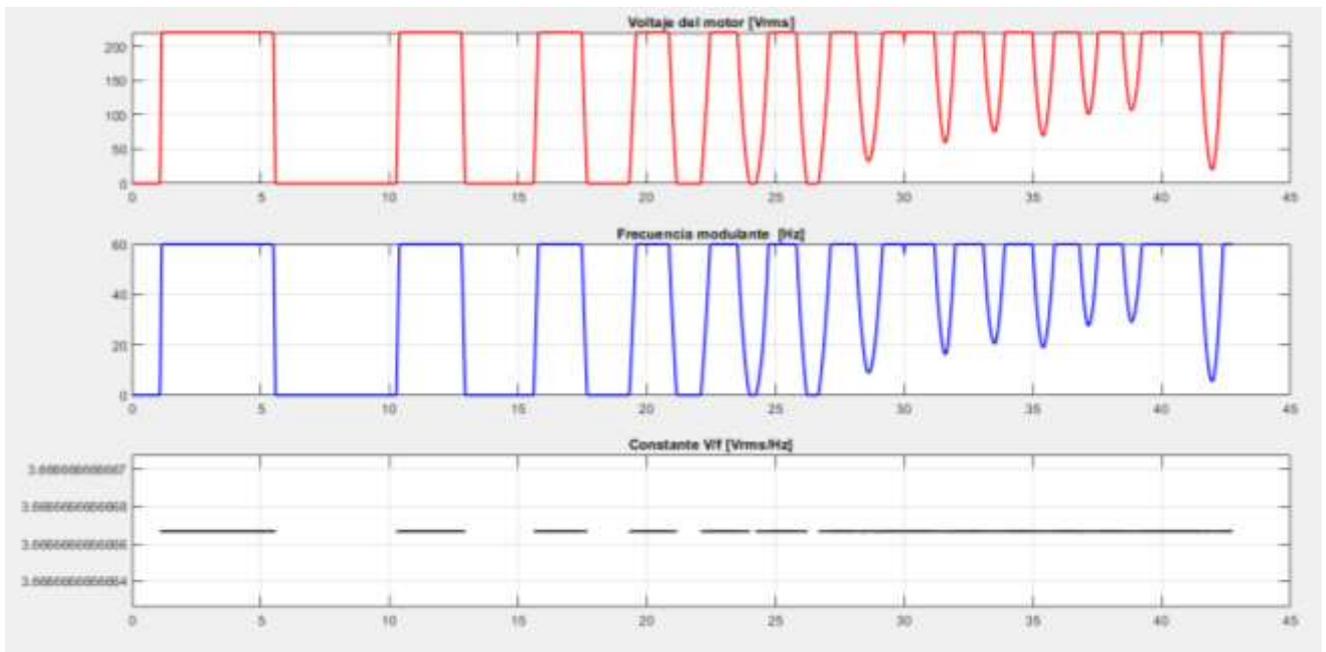


Figura B.2: Resultados de la simulación del control escalar con PI = [1.2080 0.001], ma = 0.7 y mf = 16.66

## ANEXO C

Resultados del sistema real cuando  $\alpha=20/3450$  L/rev y 19.65 L/min de suministro de la bomba con PID = [0.7080 0.5380 0.60],  $m_a = 0.7$

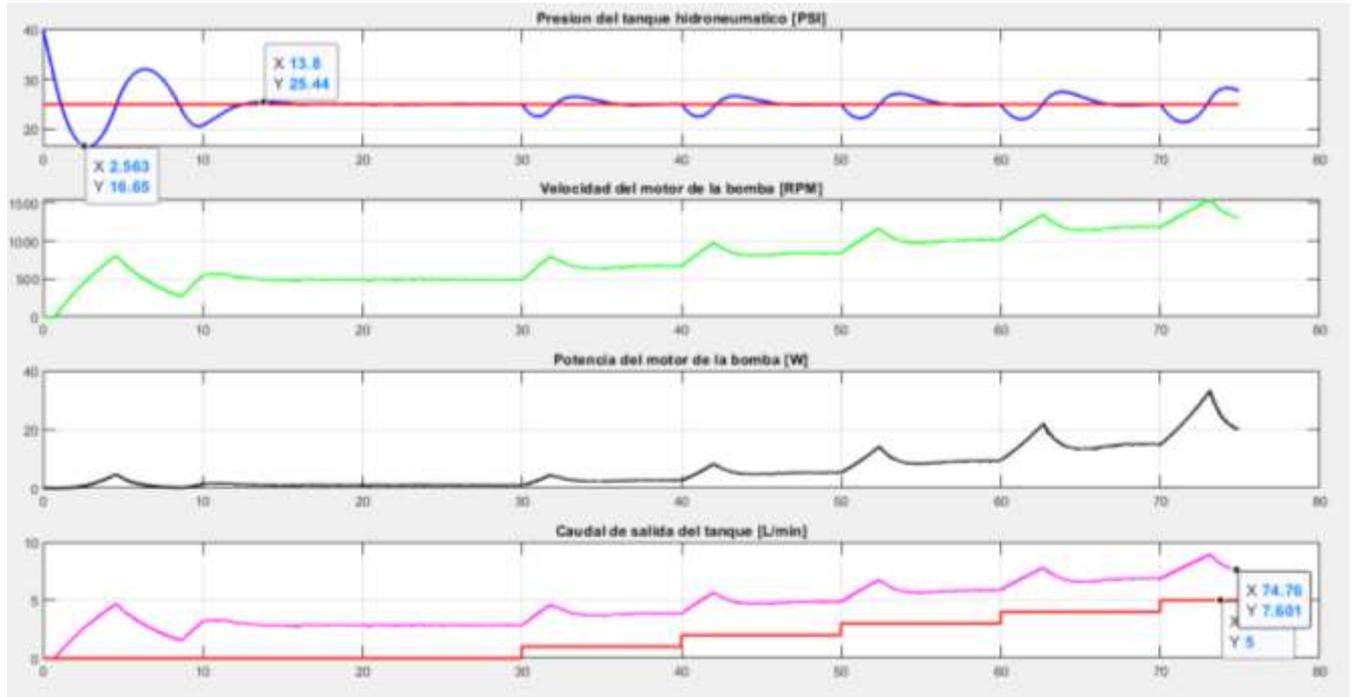


Figura C.1: Resultados de la simulación con PID= [1.7080 0.5380 0.60],  $m_a = 0.7$  y  $m_f = 16.66$

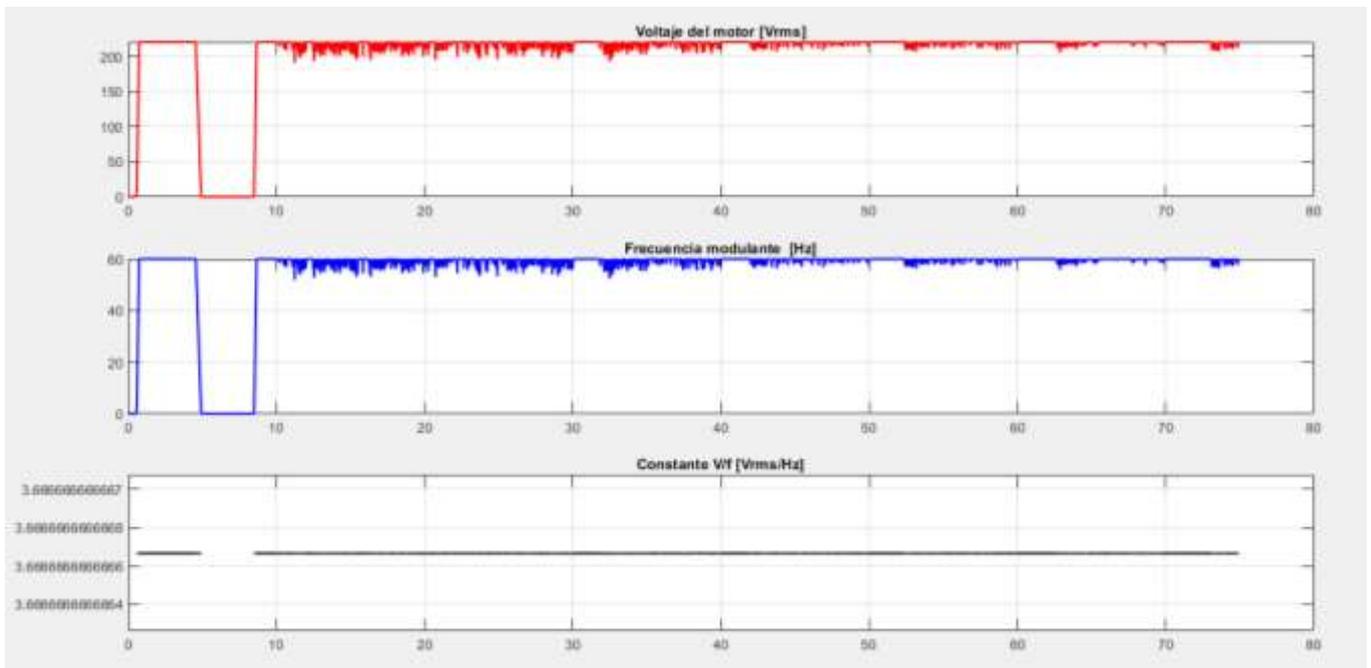


Figura C.2: Resultados de la simulación del control escalar con PID = [1.7080 0.5380 0.60],  $m_a = 0.7$  y  $m_f = 16.66$

## 6.2 Método de sintonización de asociación de polos

### ANEXO D

Resultados del sistema real cuando  $\alpha=20/3450$  L/rev, 19.65 L/min de suministro de la bomba,  $PI = [0.6570 \ 0.1262 \ 2.2620]$ ,  $ma = 0.7$  y  $mf = 15$ .

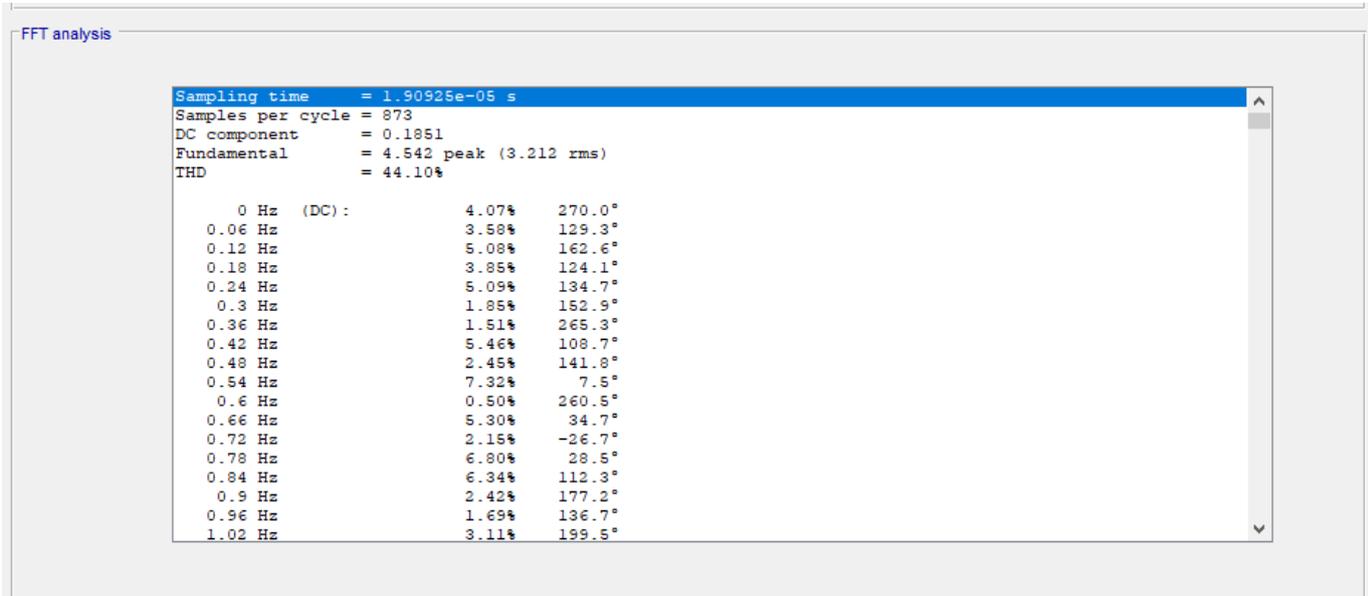


Figura D.1: Resultados de FFT para la corriente del motor

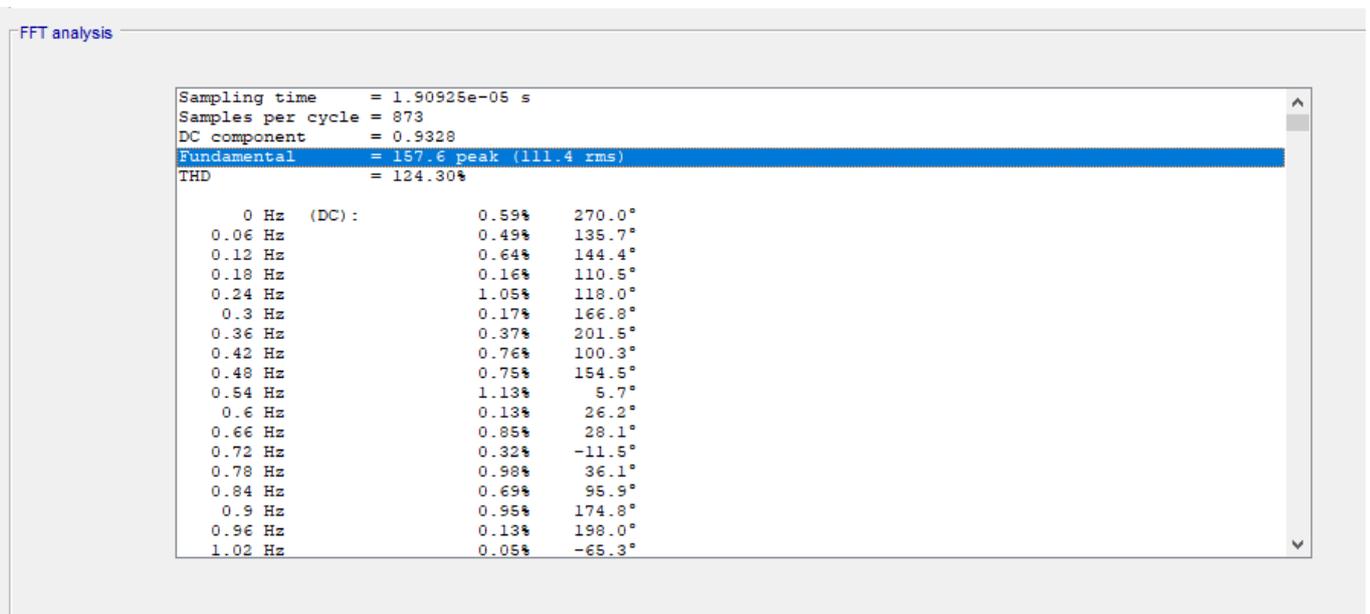


Figura D.2: Resultados de FFT para el voltaje del motor

**6.3 ANEXO E: Implementación del sistema de bombeo a presión constante para un banco de pruebas.**

