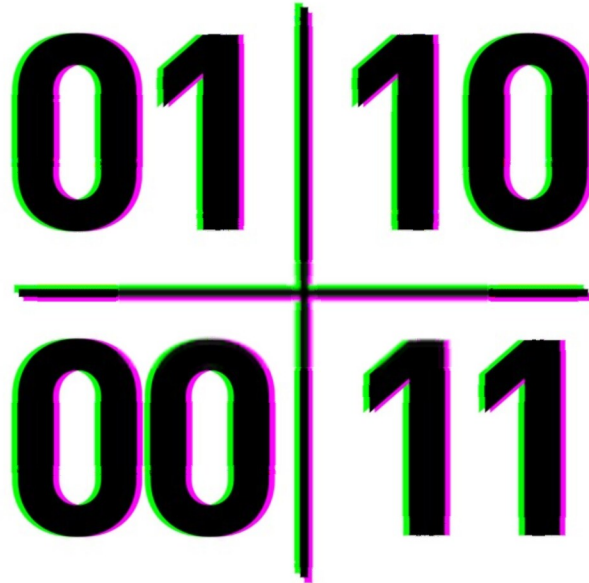


UNIVERSIDAD DE MAR DEL PLATA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Desarrollo en PLC del control de un Blender



Autor:
José Gracia Crosta

30 de mayo de 2022



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios

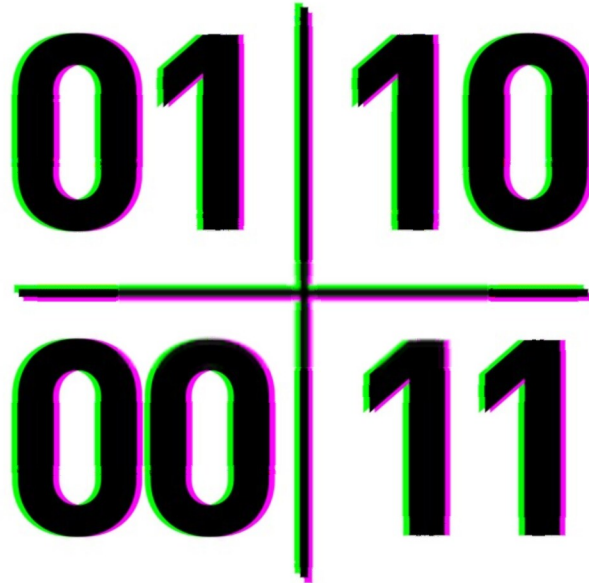


Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

UNIVERSIDAD DE MAR DEL PLATA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Desarrollo en PLC del control de un Blender



Autor:
José Gracia Crosta

30 de mayo de 2022

Índice general

1. Introducción	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Blender	6
3. PLC	13
3.1. Arquitectura	13
3.2. Programación	15
3.3. Protocolos de comunicación	16
3.3.1. Protocolo J1939	17
3.3.2. Protocolo Modbus TCP/IP	18
4. Unidad de control	21
4.1. Controlador PID	21
4.2. Sistemas controlados	24
5. Implementación	29
5.1. Estructura general	29
5.2. Módulo de entradas	29
5.3. Módulo de salidas	31
5.4. Sintonización de PID	31
5.5. Filtrado	33
5.6. Utilización de recursos	34
5.7. Control a distancia	34
6. Conclusión	36

Índice de figuras

2.1. Pozo tradicional	6
2.2. Estructura Blender	7
2.3. Motor y transmisión de bomba	8
2.4. Bomba y motor hidráulico	8
2.5. Esquema de sistemas auxiliares	9
2.6. Esquema LAS	10
2.7. Esquema tornillos	10
2.8. Esquema bomba centrífuga	11
2.9. Esquema agitador	12
3.1. Arquitectura PLC	13
3.2. CPU	14
3.3. Diagrama de flujo PLC	16
3.4. Estructura bus CAN	17
3.5. Trama protocolo J1939	18
3.6. Trama protocolo Modbus TCP/IP	19
3.7. Trama TCP/IP	20
4.1. Esquema de un lazo de control	21
4.2. Controlador PID	22
4.3. Controlador PID	23
5.1. Estructura general	29
5.2. Bloque PID	32
5.3. Filtro promedio	33
5.4. Esquema de comunicación	35

Índice de cuadros

3.1. Tipos de datos Modbus	19
3.2. Funciones Modbus	20
5.1. Valores de controladores PID	32
5.2. Utilización de recursos MC088-015	34

Glosario

- ADC** *Analogic digital converter*. Conversor analógico-digital. 23
- ALU** *Arithmetic Logic Unit*. Unidad aritmética lógica. 14
- CAN** *Controller area network*. Protocolo de comunicación de controlador de área local. 17
- CPU** *Central Processing Unit*. Unidad central de procesamiento. 13
- DAC** *Digital analogic converter*. Conversor digital-analógico. 23
- DAS** *Dry Additive System*. Sistema de aditivos secos. 6, 7, 26, 27
- gateway** Puerta de enlace. 34
- IP** *Internet Protocol*. Protocolo de internet. 20
- LAS** *Liquid Additive System*. Sistema de aditivos líquidos. 6, 7, 9, 24, 27, 30
- Modbus TCP** Protocolo de comunicaciones entre dispositivos Ethernet. 35
- OSI** *Open Systems Interconnection*. Modelo de interconexión de sistemas abiertos. 18
- PID** *Proportional, integral and derivative controller*. Controlador proporcional, integral y derivativo. 22, 23, 26
- PLC** *Programmable Logic Controller*. Controlador lógico programable. 5, 13, 16, 17, 22, 36
- RAM** *Random Access Memory*. Memoria de acceso aleatorio. 13
- ROM** *Read-only Memory*. Memoria de lectura. 13
- TCP** *Transmission Control Protocol*. Protocolo de control de transmisión. 20
- TUB** Tanque de agua. 6, 7, 11, 26, 27, 30

Capítulo 1

Introducción

La industria del petróleo y gas presenta grandes desafíos en los costos para la extracción de la materia prima. Los avances tecnológicos generan un cambio de paradigma en el diseño de los distintos equipos presentes en un pozo [1]. La búsqueda de la eficiencia energética y humana fueron los propulsores de estos cambios. La tecnología permite la reducción en el uso de gasoil para el funcionamiento de los equipos. Por otra parte, también permite la disminución del error humano.

Con el objetivo de extraer petróleo y gas de la tierra, se utilizan una gama de equipos con distintas funciones. En la actualidad existen equipos para almacenar agua y químicos (Unidad de hidratación). Como también para mezclar los distintos componentes utilizados (Blender) e introducir el fluido en el pozo (Fracturador). Todos los equipos utilizados cumplen una función esencial dentro de una fractura. Sin embargo, no todos son críticos en cuanto al control de ellos. Algunos suponen un control simple y otros, uno muy complejo.

El Blender es un equipo encargado de mezclar distintos componentes y generar un fluido apropiado en términos de viscosidad, densidad y homogeneidad [2]. Se trata del equipo más complejo dentro de un pozo debido a la precisión necesaria, como también por la cantidad de sistemas que lo componen.

Debido a la cantidad de fracturadores utilizados en un pozo y su potencia entregada, la eficiencia energética de todo el proceso depende de ellos. Sin embargo, la eficacia del pozo estará influenciada por el comportamiento del Blender. Esto es así ya que un mal funcionamiento del equipo se traduce en la detención de la operación. La aparición de técnicas de control avanzadas en las últimas décadas, y la fusión con el mundo digital generan ciertas facilidades para el diseño de un Blender eficaz.

Este trabajo presenta el diseño del control de un Blender para la empresa QM Equipment (www.qm-equipment.com) en Mar del Plata. Para ello se utiliza un controlador PLC (Programmable Logic Controller) y una interfaz para la comunicación del motor y transmisión. Se trata de un diseño completo de control local y a distancia para el equipo, totalmente personalizable y robusto.

La estructura del proyecto se diagrama de la siguiente manera: en primera instancia se presentan detalles teóricos y mecánicos del Blender. Luego, se presenta la estructura y teoría del PLC como también los protocolos utilizados. A continuación, se introduce la estructura de control, detallando aquellos sistemas que requieren de un lazo cerrado de control, para luego exponer resultados prácticos. Finalmente, se expone la conclusión del proyecto.

Capítulo 2

Marco Teórico

La fractura hidráulica, conocida como “fracking”, es una técnica utilizada con el fin de aumentar la porosidad de una formación rocosa ubicada en los pozos de extracción de la industria petrolera. Se tiene como objetivo final la extracción de gas y petróleo. Para poder lograrlo, varios equipos trabajan en conjunto, siendo uno de los más importantes y complejos, el Blender. En este capítulo se presenta la estructura general de un Blender, junto a los sistemas críticos para el correcto funcionamiento. En la Fig. 2.1 se muestra los equipos utilizados en una fractura típica.



Figura 2.1: Pozo tradicional

2.1. Blender

El Blender se trata de un equipo montado en un chasis, donde se realiza la mezcla de agua con distintos productos químicos y apuntalante (arena). Se tiene como fin crear un fluido apropiado para introducir al pozo. Esta compuesto por varios sistemas, dentro de los cuales se encuentran sistemas de adición de líquidos (LAS, Liquid Additive System) y sólidos (DAS, Dry Additive System), sistema de adición de arena, mezclador, centrífugas, etc. Para lograr el fluido adecuado, muchos de los sistemas que componen al equipo llevan una etapa de control.

Para comprender la forma en la que trabaja el equipo se puede seguir el flujo del agua desde la entrada hacia la salida.

La centrífuga de entrada succiona el agua y la introduce en el TUB, un tanque circular con un agitador en su centro, a través de una válvula que regula su paso. En él se realiza la adición de arena y otros compuestos al agua (líquidos y sólidos).

Se utilizan tornillos helicoidales sin fin para suministrar tanto la arena como los aditivos secos al TUB. Por otro lado, los aditivos líquidos se adicionan mediante bombas hidráulicas.

Dentro del TUB se mezclan los componentes por el agitador. Esto produce la suspensión de las partículas de forma más uniforme en el fluido final. Por último, una bomba centrífuga de salida expulsa el fluido hacia los fracturadores.

Se puede dividir a los sistemas que componen al Blender en dos tipos: aquellos que son controlados mediante un lazo cerrado y aquellos que no requieren control.

Los sistemas controlados mediante un lazo cerrado son:

- Sistema de ingreso de agua
- Sistema de aditivos líquidos (LAS)
- Sistema de ingreso de arena por tornillos

Los sistemas operados sin control son:

- Sistema de aditivos secos (DAS)
- Sistema de expulsión de fluido
- Agitador del TUB
- Operación de válvulas

En la Fig. 2.2 se muestra un diagrama simplificado de la estructura de un Blender.

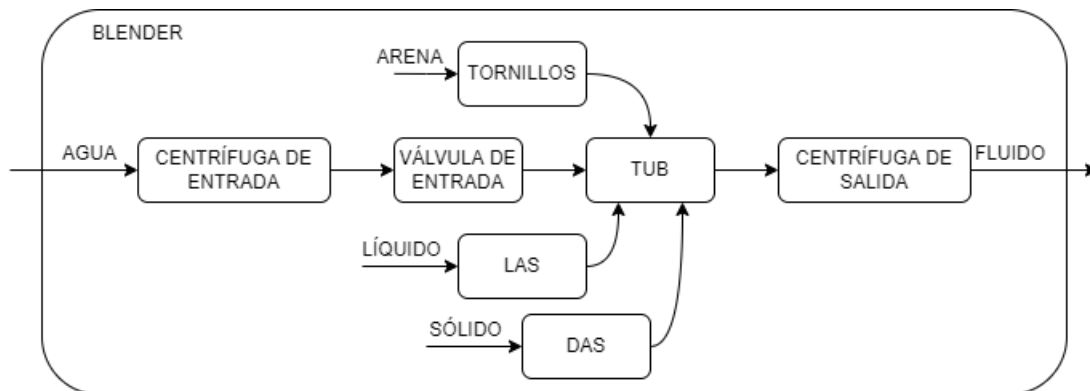


Figura 2.2: Estructura Blender

Todos los sistemas que componen al Blender obtienen energía mediante el mismo principio. El equipo posee un motor a combustión encargado de generar la potencia necesaria. Esta se distribuye mediante una caja llamada “funk pump drive” (transmisión de bomba). Esta caja transforma una entrada de un eje simple, en cuatro ejes de salida. El propósito es el de conectar sistemas independientes a la salida de cada uno de ellos. En la Fig. 2.3 se presenta un diagrama del par motor y transmisión de bomba.

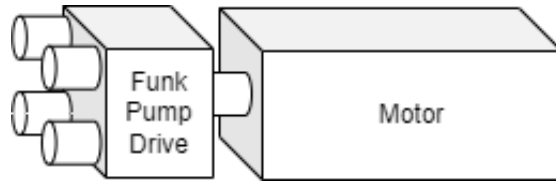


Figura 2.3: Motor y transmisión de bomba

A la salida de los cuatro ejes se conectan bombas hidráulicas a pistones, controladas por servo motores. Los servo motores se tratan de actuadores rotativos que permiten el control de la posición angular de un eje de forma precisa. Las bombas cumplen la función de generar un caudal circulante necesario para alimentar al motor hidráulico de cada sistema (ingreso de agua, aditivos líquidos y sólidos y el ingreso de arena por tornillos). Estos motores hidráulicos son los encargados de mover las distintas partes que componen al sistema, como las bombas centrífugas, tornillos helicoidales sin fin, agitador y bombas de aditivos. En la Fig. 2.4 se presenta un esquema de la bomba de pistón axial variable (bomba hidráulica) y motor hidráulico. Los servo motores se controlan por corriente mediante el PLC, el cual genera entre 15 mA y 85 mA según se necesite.

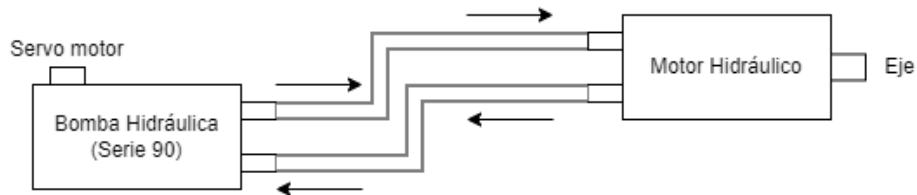


Figura 2.4: Bomba y motor hidráulico

Sin embargo, no todos los sistemas poseen una bomba hidráulica particular para su funcionamiento, sino aquellos que necesitan de una alta potencia, como las bombas centrífugas, tornillos de arena y agitador. Los sistemas de aditivos líquidos y secos (sistema auxiliar) son levemente distintos. La bomba hidráulica conectada a la transmisión de bomba no posee un servo motor, se trata de una bomba hidráulica Serie 45 [3]. Esta se conecta mediante una cañería a un set de electroválvulas que regulan el caudal de paso. Las electroválvulas o válvulas electromagnéticas se tratan de dispositivos capaces de regular el paso de un fluido. Lo logran gracias a un solenoide que acciona la válvula. Debido a que los sistemas de aditivos requieren significativamente menor potencia, se utiliza una sola bomba hidráulica para todos ellos. En la Fig. 2.5 se presenta un diagrama del funcionamiento de los sistemas auxiliares.

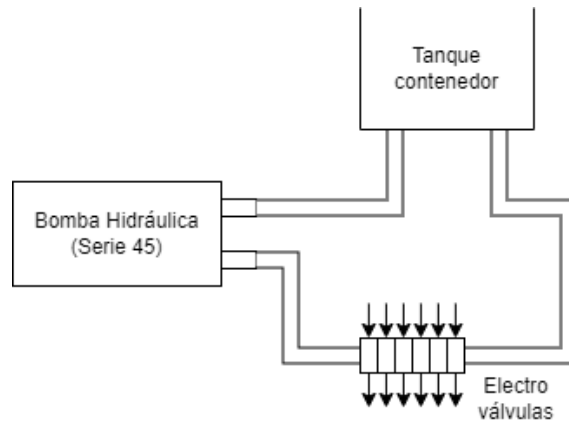


Figura 2.5: Esquema de sistemas auxiliares

Cada electroválvula se conecta a un motor hidráulico de la misma forma que lo hacen los sistemas de mayor potencia. Las electroválvulas se regulan por una salida de corriente que varía entre 15 mA y 85 mA. De esta forma, para entregar el mayor flujo hidráulico al sistema deseado se debe aplicar una corriente de 85 mA a la electroválvula del sistema particular. Mientras que los 15 mA restringen el flujo hidráulico en la línea. El set está compuesto por seis electroválvulas. Cuatro de ellas se utilizan para los sistemas de aditivos líquidos, y otras dos para los sistemas de aditivos secos.

- LAS

El LAS es un sistema de aditivos líquidos, controlado por una electroválvula. Se compone por un tanque donde se ubica el reservorio de químicos a utilizar. La adición se realiza en la línea de salida del TUB.

Para poder controlar el LAS, se utiliza un sensor de caudal ubicado en línea con la salida. De esta forma, se puede ajustar el caudal deseado mediante una etapa de control en la cual la realimentación es el caudal. En la Fig. 2.6 se presenta un esquema del sistema de aditivos líquidos.

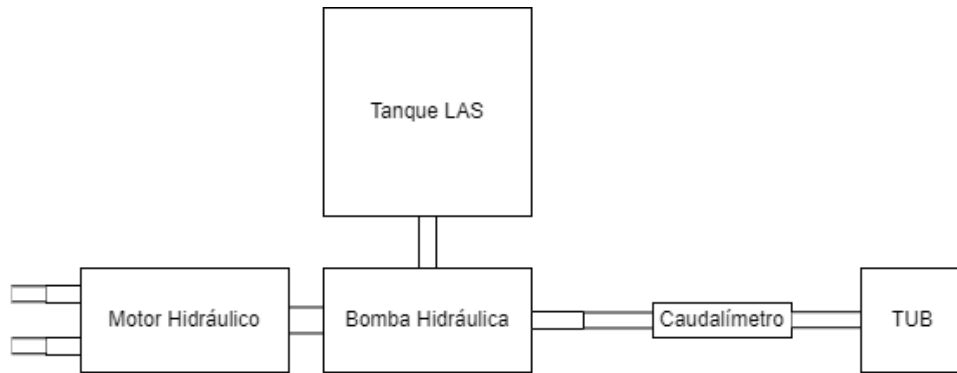


Figura 2.6: Esquema LAS

- DAS

El DAS es un sistema de aditivos compuesto por un tornillo helicoidal sin fin que desplaza horizontalmente los sólidos dentro del TUB. El tornillo se encuentra dentro de una tolva junto al material a desplazar. En la Fig. 2.7 se presenta un diagrama del funcionamiento del DAS.

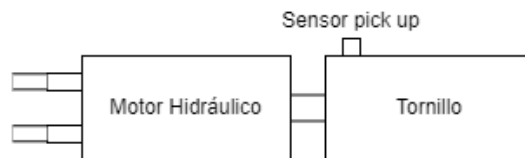


Figura 2.7: Esquema tornillos

El tornillo posee un sensor magnético de tipo pick up para observar las revoluciones del tornillo. De esta forma, se puede adicionar según el operario lo requiera.

- Sistema de ingreso de arena por tornillos

Los tornillos helicoidales sin fin de arena cumplen una función primordial en el funcionamiento del Blender. La arena se utiliza para mantener la porosidad en la formación rocosa del reservorio petrolífero. La dosificación se realiza mediante dos tornillos de forma directa en el TUB. Los tornillos de arena funcionan de igual forma que los tornillos utilizados en los DAS (Fig. 2.7). Sin embargo, los DAS pertenecen al sistema abierto (auxiliar), mientras que los tornillos de arena están conectados por bombas Serie 90 [4] directo a la transmisión de bomba. El control de los tornillos sin

fin se realiza a partir del sensor magnético, ajustando las revoluciones por minuto necesarias.

A partir de este momento se hará referencia a los tornillos helicoidales sin fin como tornillos.

- Sistema de ingreso de agua y expulsión de fluido

Las bombas centrífuga de entrada y salida son, junto a los tornillos de arena, dos sistemas principales del equipo. Cada una de ellas es encargada de impulsar el fluido dentro del TUB (centrífuga de entrada) y fuera del TUB (centrífuga de salida). Ambas bombas tienen una capacidad de 60 barriles por minuto (9539 litros por minuto). En la Fig. 2.8 se presenta un esquema de las bombas centrífugas.

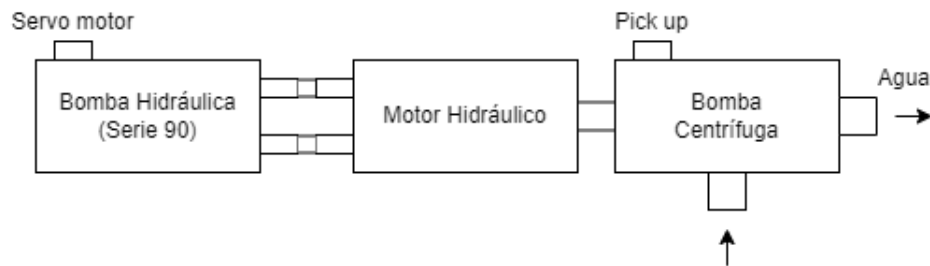


Figura 2.8: Esquema bomba centrífuga

Para el control de las bombas se utilizan dos sensores de caudal en serie. Un sensor de caudal magnético, y un sensor de caudal turbina. Cada uno presenta sus ventajas y desventajas. El sensor magnético es mas preciso cuando el fluido es uniforme. Sin embargo, el sensor de turbina presenta menores variaciones frente a un cambio de composición del fluido. Ambas bombas están equipadas con sensores pick up para dar seguimiento a las revoluciones por minuto.

- Agitador

El agitador se encarga de mezclar todo lo que ingresa al TUB. El objetivo es suspender todas las partículas sólidas que se adicionan para poder expulsar un fluido uniforme. No se utiliza ningún sensor para realimentar el estado del agitador. Simplemente se lo acciona mediante un potenciómetro. En la Fig. 2.9 se presenta el esquema del agitador.

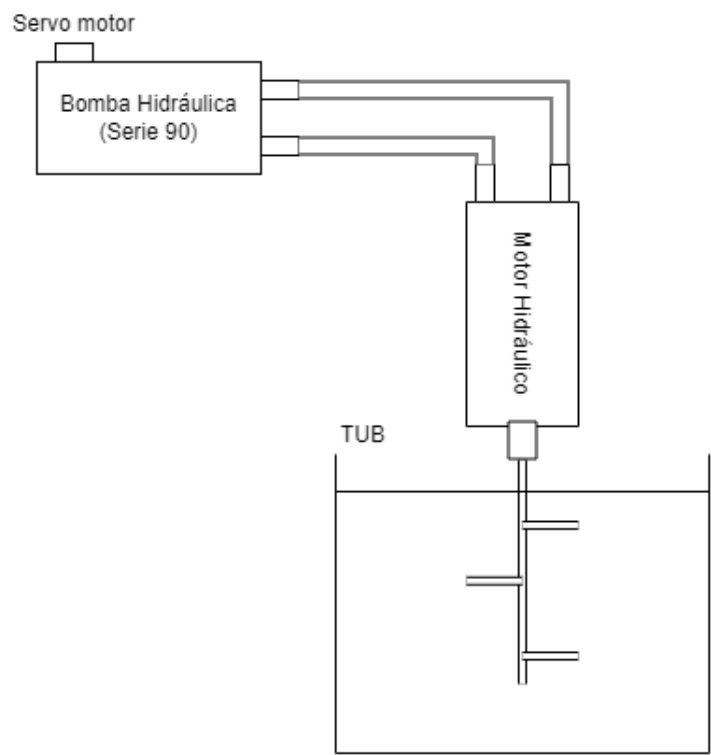


Figura 2.9: Esquema agitador

Capítulo 3

PLC

La búsqueda para conseguir la automatización industrial derivó en la aparición de dispositivos conocidos como PLC, o controlador lógico programable. Estos dispositivos surgieron como alternativa a los circuitos eléctricos de lógica combinacional, con relés e interruptores. Debido a su sencilla programación, flexibilidad, y adaptación a distintos ambientes, cobraron una relevancia importante desde entonces. Fue rápidamente adoptado por la industria automotriz, lo que derivó en el desarrollo de múltiples herramientas para el control y la comunicación de motores y transmisiones. Dentro de los desarrollos en la comunicación se encuentra el protocolo J1939, el cual cumple un rol fundamental en el diseño del sistema.

3.1. Arquitectura

Los PLC están típicamente compuestos por cuatro estructuras básicas. El CPU (Central Processing Unit) o unidad central de procesamiento, un módulo de entradas, un módulo de salidas, y memoria tanto RAM (Random Access Memory), como ROM (Read-Only Memory) [5] [6]. En la Fig. 3.1 se presenta la arquitectura de un PLC.

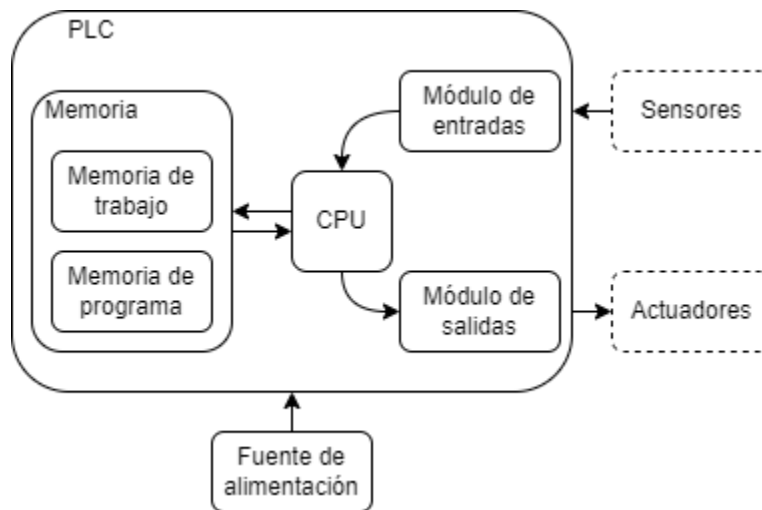


Figura 3.1: Arquitectura PLC

- CPU

La unidad central de procesamiento es el cerebro del dispositivo. Se encarga de procesar todos los datos de entrada, realizar las operaciones predefinidas, y efectuar decisiones sobre ellas. Esta unidad de compone de diversas sub-unidades como: ALU (Arithmetic Logic Unit), acumulador, contador de programa, pila, decodificador y reloj y secuenciador. En la Fig. 3.2 se presenta la arquitectura general del CPU.

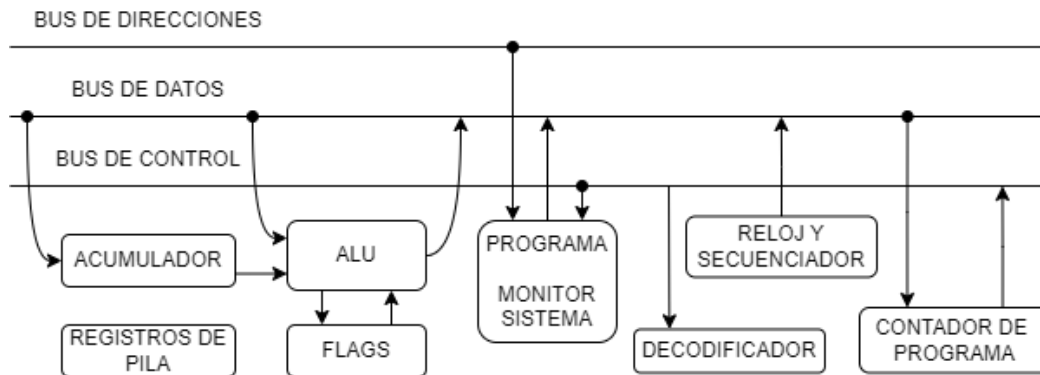


Figura 3.2: CPU

1. ALU: realiza las operaciones aritméticas.
2. Acumulador: almacena los resultados de la ALU.
3. Contador de programa: encargado de la lectura de las instrucciones del usuario.
4. Pila: registro con las instrucciones a realizar.
5. Flags: indicadores de resultado.
6. Decodificador: encargado de decodificar las instrucciones a realizar.

- Memoria

La unidad de memoria esta compuesta por memoria de trabajo y memoria de programa. La memoria de programa se utiliza para almacenar todas las instrucciones que el CPU debe procesar. Para poder realizar distintas tareas, se traduce el programa a instrucciones básicas. Este conjunto de instrucciones básicas se conoce como lenguaje de máquina, y es interpretable por un microprocesador. Las instrucciones

pueden ser la carga/lectura de algún registro o memoria, como también realizar alguna operación aritmética. El tipo de memoria utilizado para el programa es del tipo ROM, ya que solo se debe leer durante su ejecución.

Por otro lado, la memoria de trabajo se utiliza para almacenar todos los datos que se necesitan para ejecutar el programa. Esto puede ser la conversión de datos de entrada analógicos a digitales, datos intermedios necesarios para el programa, como también datos de salida. El tipo de memoria utilizada en este caso es del tipo RAM, lo que brinda una mayor rapidez a la hora de procesar datos.

- Módulo de entradas

Para poder realizar una acción de control es necesario conocer el estado actual de aquello que se desea controlar. El módulo de entradas corresponde a todas las conexiones internas del PLC que leen las entradas y las convierten para poder ser posteriormente utilizadas. Las entradas pueden dividirse en distintos tipos como: digital, analógica, frecuencia, temperatura, entrada 4-20 mA, etc. Sin embargo, se precisa de algún tipo de sensor externo al PLC que sea capaz de medir la variable. El sensor transforma esta medición en algún tipo de dato interpretable por el PLC.

- Módulo de salidas

Luego de ejecutar el programa, es necesario tomar acción sobre alguna salida (actuador) para poder controlar una variable deseada. De manera similar al módulo de entradas, el módulo de salidas refiere a las conexiones internas del PLC que convierten datos generados por el programa en valores de salida reales. Estos valores pueden ser del tipo digital, analógico, de frecuencia, etc. Para poder actuar sobre algún proceso, es necesario un actuador externo al PLC. El actuador interpreta y transforma la salida generada por el PLC en cierta acción. Ejemplo: aumentar las RPM de un motor.

3.2. Programación

La programación de un PLC consiste en la definición de una serie de instrucciones en un orden específico. El objetivo es el de resolver una o muchas tareas predeterminadas. Se puede dividir la tarea del controlador en tres pasos que se repiten (Figura 3.3). Inicialmente se leen las distintas entradas, luego se utilizan las entradas junto a parámetros definidos en el programa para ejecutar el control. Finalmente se actualizan los valores de salidas según el resultado que genere el programa.

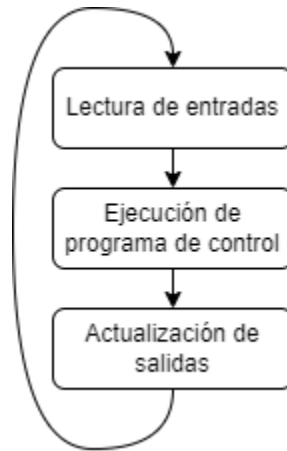


Figura 3.3: Diagrama de flujo PLC

Existen distintos lenguajes utilizados para programar un PLC [7]. Entre ellos tenemos: diagrama de funciones secuenciales (SFC), diagrama de bloques de funciones (FBD), diagrama de tipo escalera (LAD), texto estructurado (ST) y lista de instrucciones (IL). Se puede dividir los lenguajes en gráficos (SFC, FBD y LAD) y escritos (ST e IL). Los lenguajes gráficos permiten describir al sistema mediante símbolos, similares a los que se utilizan en los planos esquemáticos y diagramas en bloques. Por otro lado, los lenguajes escritos son sentencias que describen una función a ejecutar.

La programación del PLC consiste de distintas fases: definición y análisis del problema, definición del hardware, diseño de algoritmos, programación del código y depuración y verificación del código.

Inicialmente, se deben identificar los problemas a resolver. Tanto la información necesaria para ello, como también la información que se debe producir. Esta fase corresponde a la definición y análisis del problema. Una vez finalizada la fase inicial, se definen los requerimientos de hardware. Se debe tener en cuenta la cantidad de entradas y salidas necesarias, como también las interfaces utilizadas en la aplicación. Posteriormente se diseña el conjunto de algoritmos necesarios para la correcta programación del PLC. Por último, se debe depurar y verificar el código para asegurar el correcto funcionamiento.

3.3. Protocolos de comunicación

Muchas aplicaciones necesitan de la modificación de ciertos parámetros en tiempo real para funcionar correctamente. Ya sea generar alguna acción sobre un actuador

o cambiar algún parámetro de operación, es necesario establecer una comunicación con el PLC.

3.3.1. Protocolo J1939

El protocolo J1939 es un grupo de normas utilizados en motores y transmisiones vehiculares, basado en el protocolo CAN 2.0B [8]. El protocolo CAN fue desarrollado en los años 1980 por la empresa alemana Robert Bosch [9]. Posee diferentes ventajas frente a otros protocolos como la alta inmunidad a interferencias, detección y corrección de errores, sistema con soporte de broadcast y muchos maestros. El bus se trata de un par de cables trenzados con una impedancia característica de 120Ω . Se pueden lograr velocidades de hasta 1000 kbit/seg a una distancia máxima de 40 metros. La Fig. 3.4 presenta una estructura general del bus CAN.

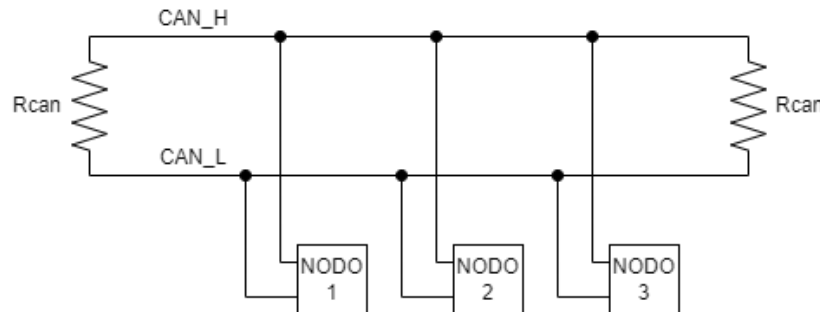


Figura 3.4: Estructura bus CAN

Existen dos estados para el bus: estado dominante y recesivo. En el estado recesivo ambos cables se encuentran en el mismo nivel de tensión. Mientras que en el estado dominante existe una diferencia entre ellos. La transmisión se da en forma diferencial entre el par trenzado, a una tensión definida entre 1.5V y 3V .

Las resistencias R_{CAN} deben ser del mismo valor que la impedancia característica de la línea (120Ω). Esto genera una resistencia equivalente entre ambos cables de 60Ω .

Los mensajes enviados por este bus son generalmente de tipo broadcast, siendo identificados por números llamados PGN (Parameter Group Number). Por ejemplo, la información sobre el estado de las revoluciones por minuto del motor se transmite a todos los dispositivos conectados en la red, con un PGN único que identifica este dato. En la Fig. 3.5 se presenta la estructura de la trama de J1939.

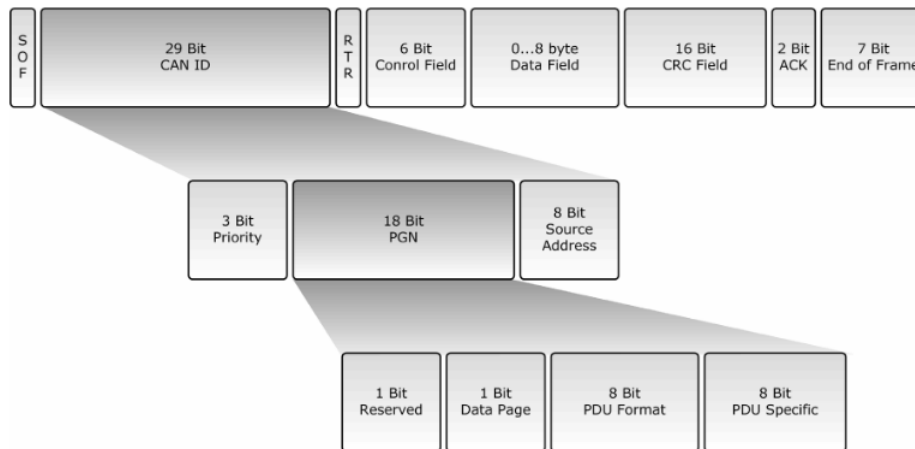


Figura 3.5: Trama protocolo J1939

Si bien este protocolo presenta una alta robustez, se pueden presentar problemas cuando se tiene una red de equipos funcionando bajo el mismo bus. Para aplicaciones de gran tamaño se debe buscar alternativas para la comunicación.

3.3.2. Protocolo Modbus TCP/IP

Modbus TCP/IP es un protocolo de comunicaciones que permite la comunicación entre equipos industriales. Fue desarrollado en 1979 y desde entonces se ha transformado en un método estándar de transmisión de datos sobre una red [10]. Se trata de un protocolo de esquema maestro-esclavo, donde el maestro transmite comandos y los esclavos responden a ellos. El maestro puede enviar comandos con dirección individual o de tipo broadcast, mientras que los esclavos solo pueden responder de forma individual al maestro.

El protocolo Modbus define reglas para organizar e interpretar información, independientemente de la capa física. Es decir, corresponde a un protocolo que trabaja sobre el nivel de aplicación del modelo OSI (capa 7).

En la Fig. 3.6 se presenta el formato de la trama de Modbus TCP/IP [11]. Se definen distintos campos para poder identificar los comandos de manera exitosa. En principio, se distingue la cabecera de la trama (MBAP - Modbus Application Protocol Header) y la unidad de datos (PDU - Protocol Data Unit).

Dentro de la cabecera existen tres campos de identificación y uno de longitud. El campo de identificador de transacción se utiliza para distinguir y emparejar transacciones realizadas sobre una misma conexión TCP. El identificador de protocolo vale siempre cero para Modbus y se reserva para una futura extensión. El campo de

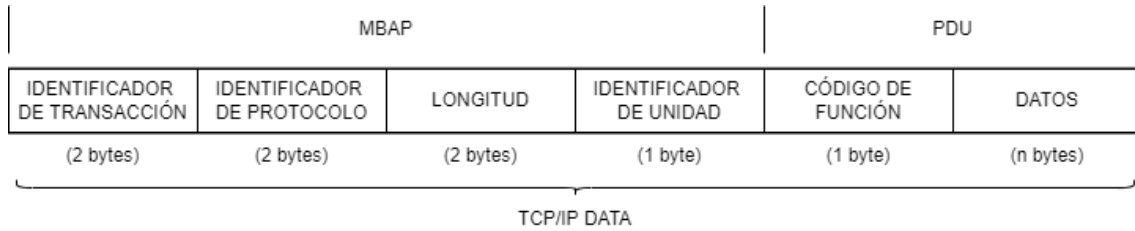


Figura 3.6: Trama protocolo Modbus TCP/IP

longitud corresponde a la longitud de los campos restantes (incluyendo el identificador de unidad). Por último, el identificador de unidad se utiliza para identificar un servidor remoto que no este localizado en una red TCP/IP. Por otro lado, la unidad de datos se compone por un código de función, y el campo de datos. Este último campo esta definido por la longitud declarada en la cabecera.

Registros y funciones

Existen una serie de funciones que se pueden utilizar en una comunicación Modbus [12]. Las funciones operan sobre registros de memoria para configurar, monitorear y controlar distintos dispositivos. Los registros funcionan según un mapa de registros, donde se almacenan los datos enviados.

En el cuadro 3.1 se presentan los distintos tipos de datos Modbus, junto a su tamaño.

Tipo de dato	Tamaño
Entrada digital	1 bit
Salida digital	1 bit
Registro de entrada	2 bytes
Registro de salida	2 bytes

Cuadro 3.1: Tipos de datos Modbus

Las funciones definidas dependen del tipo de dato a manipular. Los códigos de funciones se presentan en el cuadro 3.2

Código	Función
01	Estado de salida digital
03	Lectura de registros de salida
04	Lectura de registros de entrada
05	Escritura salida digital
06	Escritura registro de salida
15	Escritura de múltiples salida digitales
16	Escritura de múltiples registros de salida
17	Reporte de ID de esclavo

Cuadro 3.2: Funciones Modbus

TCP/IP

La trama de Modbus se envía mediante TCP/IP. Esto da ciertas seguridades sobre el envío de información. El protocolo TCP asegura la correcta recepción de los paquetes enviados, mientras que el protocolo IP se encarga del enrutamiento y la correcta asignación de direcciones. En la Fig. 3.7 se presenta la trama de TCP/IP. En ella, el campo de datos de aplicación se embebe con la trama de Modbus.

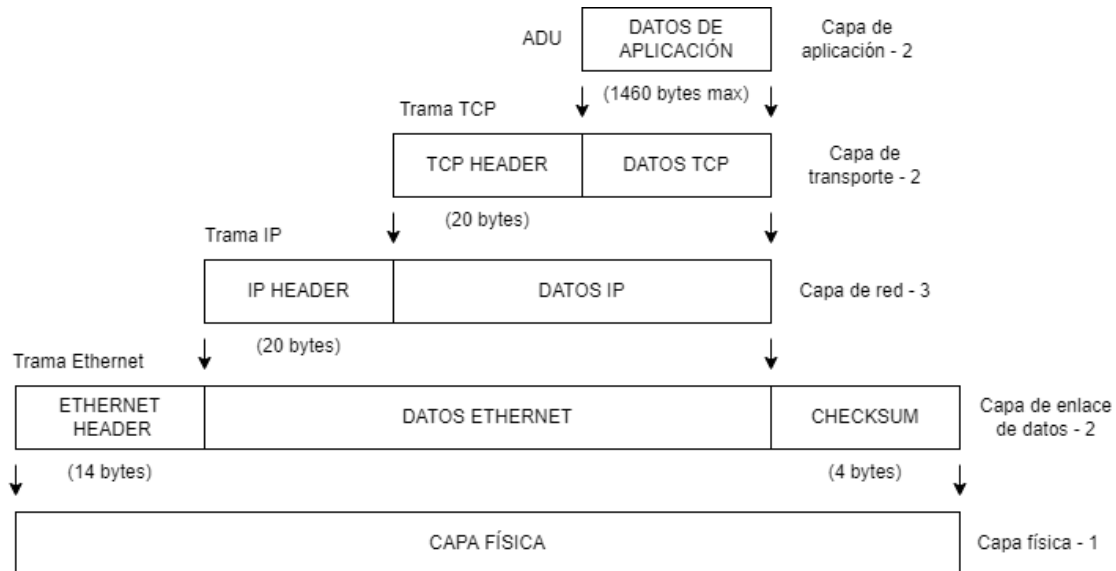


Figura 3.7: Trama TCP/IP

Capítulo 4

Unidad de control

Debido a la importancia y precisión requerida en el funcionamiento del equipo, no se puede librar el control a un operario. Es necesario introducir un elemento adicional para generar un comportamiento fiable y repetitivo. Es por eso que se utilizan controladores en los distintos sistemas que componen al Blender.

En un sistema típico se define la señal de error como la diferencia entre la entrada (señal deseada o setpoint) y la realimentación (obtenida por un sensor). El controlador es un elemento encargado de procesar la señal de error y producir una salida a partir de ella, con el objetivo de minimizar esta diferencia. En la Fig. 4.1 se muestra un esquema típico de un lazo de control realimentado. Aquí, el proceso es lo que se desea controlar. Mediante un sensor se obtienen muestras del valor actual de salida, y se realimenta para generar una nueva acción.

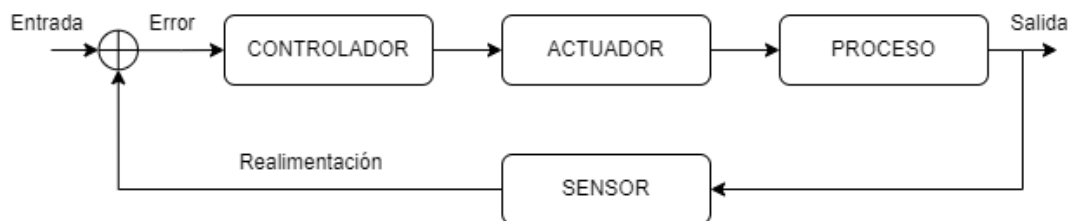


Figura 4.1: Esquema de un lazo de control

4.1. Controlador PID

El PID es un mecanismo de control que combina la acción proporcional, integral y derivativa del error para generar una señal de control. Es uno de los métodos mas conocidos y utilizados en la industria, dada su facilidad de interpretación e implementación. En la Fig. 4.2 se presenta un diagrama de un controlador PID. La señal de control $c(t)$ esta dada por la siguiente ecuación:

$$c(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

La acción proporcional actúa sobre el error en tiempo real, siendo mas grande cuanto mayor sea el error. Esta definida como $K_P \cdot e(t)$. Aumentar la constante K_P

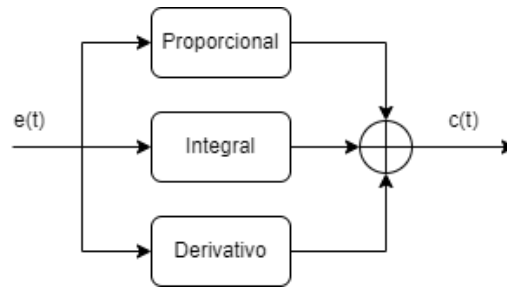


Figura 4.2: Controlador PID

genera una respuesta mas rápida (mayor velocidad del sistema) y disminuye el error en régimen permanente. Sin embargo, también puede introducir inestabilidad en el sistema.

La acción integral se define como $K_I \int e(t) dt$, la cual computa la suma del error a medida que transcurre el tiempo. El efecto producido es el de la disminución del error en régimen permanente. El aumento de la constante K_I aumenta el aporte de la integral a la señal de control. Esto puede generar un aumento de la inestabilidad del sistema, como también un leve aumento de la velocidad de respuesta y disminución del error. Esta acción posee un mecanismo de regulación conocido como anti-windup, el cual limita el valor de integración para evitar comportamientos no deseados frente a un sistema que no es capaz de erradicar el error en régimen permanente.

La acción derivativa se define como $K_D \frac{de(t)}{dt}$. Cuanto mayor sea el cambio en el error (o la constante K_D) mayor sera la acción derivativa. Esto significa que se comporta de forma “predicativa” frente al error. Aumentar la constante K_D genera un aumento en la estabilidad del sistema, disminuye la velocidad de respuesta y no afecta al error en régimen permanente. Es importante aclarar que en procesos muy ruidosos, la acción derivativa puede generar problemas debido a cambios repentinos de la señal de error. Es por eso que se la debe tratar con cuidado.

El controlador PID puede ser analógico o digital, cada uno con sus ventajas y desventajas. Debido a la utilización de un PLC, el controlador sintetizado es digital. Esto presenta ciertas ventajas [13], entre las cuales se encuentran:

- Presenta una alta flexibilidad, se pueden realizar cambios y ajustes simplemente modificando el algoritmo. Mientras que en un controlador analógico se deben cambiar componentes.
- Los controladores digitales presentan una menor sensibilidad al ruido electromagnético.

- Tienen un desempeño preciso, al ser representados de forma binaria.
- Los controladores digitales representan un menor costo. Se puede ampliar la cantidad de controladores implementados bajo un mismo microcontrolador, lo que reduce el costo considerablemente.

Sin embargo, la interfaz con sistemas analógicos siguen estando presentes. Se deben utilizar conversores analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC) como interfaz con el sensor y el actuador. En la Fig. 4.3 se presenta un diagrama del típico de un lazo de control con un PID digital.

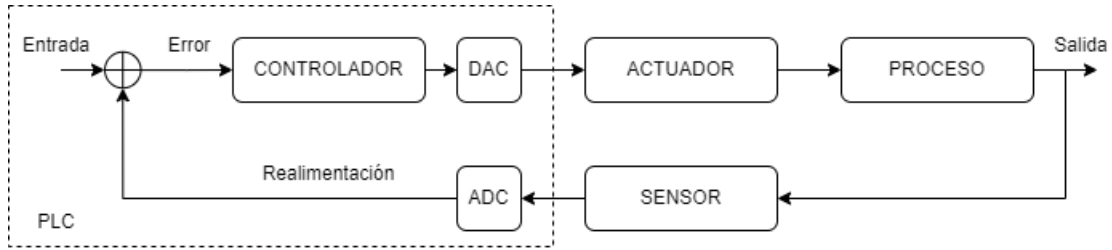


Figura 4.3: Controlador PID

Por otro lado, el cálculo de la señal de control depende del tiempo de muestreo que se utilice. Las acciones integral y derivativa dejan de ser continuas y se debe utilizar métodos para aproximar sus valores. Es necesario encontrar una representación discreta e implementable dentro del mundo digital. Se denota el error como $e(n)$, siendo n la muestra actual.

La acción proporcional no sufre cambios respecto al modelo continuo, se puede definir como $K_P \cdot e(n)$.

La acción integral se define como la sumatoria del error multiplicado por una constante. El tiempo de muestreo utilizado se reemplaza por el tiempo de ejecución del microcontrolador ($ExecTm$). Esto genera una acción integral mas robusta y semejante a la realidad. Finalmente, se adiciona la acción integral de la muestra anterior para poder realizar la sumatoria. La ecuación $I(n)$ discreta se puede definir como:

$$I(n) = K_i \cdot e(n) \cdot ExecTm + I(n - 1) \quad (4.2)$$

La acción derivativa se obtiene a partir del análisis discreto de la derivada. Se define como:

$$D(n) = \frac{(e(n) - e(n - 1)) \cdot Kd}{T} \quad (4.3)$$

Donde $e(n)$ corresponde al error en la muestra actual, $e(n - 1)$ corresponde al error de la muestra previa, y T es el tiempo de muestreo. Es necesario tener en cuenta el efecto del tiempo de muestreo en un controlador digital. Si es demasiado alto se puede presentar inestabilidad en el sistema y resultar ser no controlable. Por otro lado, un tiempo de muestreo pequeño afecta al termino derivativo de forma que el ruido de alta frecuencia se hace presente en el sistema. Además, la diferencia entre dos entradas consecutivas es más pequeña, lo que afecta al ruido de cuantificación de los conversores analógico digitales. Como regla general se puede tomar un tiempo de muestreo 10 veces menor al tiempo de respuesta del sistema.

4.2. Sistemas controlados

Se diseñaron distintos métodos de control para aquellos sistemas que lo necesitan. Todos los sistemas que componen al Blender poseen un control manual ubicado en la cabina del equipo. Desde allí, el operario puede tomar la decisión del modo a utilizar. Todos los sistemas mencionados en la sección presente contienen tres modos de operación:

- Control manual
- Control por software
- Control automático

Dentro de los sistemas que poseen un controlador digital están: LAS, la centrífuga de entrada y los tornillos de arena. Es importante mencionar que el sistema de aditivos secos (DAS), si bien solo poseen un control manual, sigue siendo un sistema importante dentro del equipo.

1. LAS

El LAS (Liquid Additive System) es un sistema de adición de líquidos. Como se presentó en el Capítulo 2, el sistema se compone por una electroválvula que regula el paso de fluido por un motor hidráulico, que a su vez alimenta una bomba. De esta forma, al controlar la apertura de la electroválvula, se puede controlar el caudal generado. Además, se utiliza un sensor de caudal en línea para poder controlar el sistema.

La etapa de lectura se compone por un sensor de caudal ubicado en línea a la salida de la bomba. Este sensor se conecta a una entrada analógica, la cual es escalada. Posteriormente, se filtra el valor para obtener una medición estable.

Para controlar la electroválvula, se pueden utilizar los métodos nombrados.

Control manual

Este modo responde de forma directa a un potenciómetro ubicado en la cabina, de forma que se aplica una corriente proporcional a la posición del potenciómetro sobre la electroválvula. Para el modo de control manual no se utiliza un PID.

Control por software

El control por software responde a un ajuste manual del caudal de salida, realizado por software. A diferencia del ajuste manual, en este tipo de control se indica un caudal en galones por minuto. Mediante la medición del sensor de caudal y el sistema de control conformado por un PID, se ajusta la salida de corriente. De esta forma se regula la apertura de la electroválvula y así el caudal.

Control automático

El control automático difiere levemente del control manual. En este modo, se especifica el caudal deseado para la adición líquida en función del caudal de salida del Blender. Esto implica un caudal de LAS variable según varíe el caudal de la bomba centrífuga de salida. Luego, se define un caudal en galones cada mil galones de salida (GAL/MGAL). Para la realimentación utilizada se debe tener en cuenta el sensor de caudal de la centrífuga de salida.

2. Sistema de ingreso de agua

La centrífuga de entrada se encarga de mantener un caudal de ingreso constante al Blender. Esta compuesta por una bomba hidráulica conectada a un motor hidráulico. La bomba genera un caudal hidráulico controlado por un servo motor. El motor hidráulico se conecta al eje de la bomba centrífuga y gracias al caudal generado por la bomba, rota.

A diferencia del resto de los sistemas, las bombas poseen cada una de ellas dos sensores de caudal en línea. Un sensor magnético y uno de turbina. El sensor magnético presenta una precisión mayor al sensor de turbina. Sin embargo, el sensor de turbina presenta una menor desviación de la medición frente a un fluido heterogéneo. El caudal se especifica en barriles por minuto.

El servo motor ubicado en la bomba hidráulica se puede controlar según los métodos nombrados anteriormente.

Control manual

El control manual consiste de un potenciómetro ubicado en la cabina del Blender. Las variaciones generadas en este potenciómetro responden directamente a variaciones de corrientes aplicadas sobre el servo motor. De esta forma, se generan entre 15 mA y 85 mA según la posición del potenciómetro. El control manual no hace uso de un controlador digital.

Control por software

El servo motor ubicado en la bomba hidráulica controla su apertura según la corriente entrante a él. El control por software hace uso de un PID para poder ajustar esta corriente conforme se necesite. Debido a que se tienen dos sensores, la realimentación estará dada según se decida utilizar el sensor magnético o de turbina. El caudal se especifica en barriles por minuto.

Control automático

El caudal de funcionamiento del equipo esta dado por la centrífuga de salida. Una solución razonable para el control automático sería ajustar la centrífuga de entrada con la de salida. Sin embargo, esto vincula a ambos caudales y puede introducir comportamientos no deseados. Mantener el nivel de fluido en el TUB es una solución preferible. El control automático de la centrífuga de entrada regula el caudal según el nivel deseado. Este mecanismo es de gran importancia para prevenir un rebalse. De esta manera, se indica un porcentaje de nivel de TUB (en función del 100%). La centrífuga de entrada se aísla del caudal de funcionamiento del Blender, y solo intenta mantener el nivel indicado.

3. Sistema de ingreso de arena por tornillos

En el Capítulo 2 se menciona la arena y su rol en el aumento de la porosidad en la formación rocosa. Los tornillos se encargan de subirla e introducirla dentro del TUB. Similar al DAS, se utiliza un par de tornillos helicoidales sin fin. Sin embargo, debido al peso de la arena, la magnitud y potencia requerida por los tornillos de arena es significativamente mayor. Estos se controlan mediante un servo motor ubicado en la bomba hidráulica. La bomba alimenta un motor hidráulico unido al eje de los tornillos.

Los tornillos poseen un sensor magnético de tipo pick up, donde se obtiene información de las revoluciones por minuto de ellos. Para conocer la cantidad de arena introducida, se debe relacionar las revoluciones con la cantidad de arena desplazada por revolución.

Control manual

Al igual que los demás sistemas, el control manual de los tornillos consiste en un potenciómetro ubicado en la cabina. Las variaciones generadas en él, producen variaciones sobre la corriente de alimentación del servo motor. Esto a su vez genera un aumento o disminución en las revoluciones por minuto de los tornillos.

Control por software

El control por software de los tornillos utiliza el sensor magnético para obtener la realimentación de las revoluciones por minuto. En base a esta medición se ajusta las revoluciones deseadas. Luego, la corriente de salida se controla para poder alcanzar y mantener el punto deseado de trabajo.

Control automático

De forma similar al funcionamiento del LAS, el control automático de los tornillos responde al caudal de salida. El objetivo es llegar a una cierta concentración de arena. Mantener las revoluciones según el caudal de salida es beneficioso de modo que no se deben realizar ajustes frente a problemas con las bombas. Por lo tanto, se define el funcionamiento de los tornillos en [RPM/MGAL], o revoluciones por minuto cada mil galones de salida.

4. DAS

El DAS (Dry Additive System) es un sistema de adición de secos. Como se mostró en el Capítulo 2, el sistema esta compuesto (al igual que el LAS) por una electroválvula que regula el paso de fluido hacia un motor hidráulico. Este motor esta unido al eje de un tornillo helicoidal sin fin, que empuja el aditivo dentro del TUB.

La etapa de lectura se compone de un sensor magnético de tipo pick up, del cual se obtiene información acerca de las revoluciones por minuto del tornillo.

El sistema de aditivos secos posee un control manual por potenciómetro. De esta forma, se genera una corriente entre 15 mA y 85 mA para controlar la posición de la electroválvula.

5. Sistemas adicionales

Existen varios sistemas adicionales que componen al blender, pero que no suponen una etapa de control. Varios de ellos implican simplemente sensar variables, mientras que otros actúan sobre una salida. Entre las variables sensadas se encuentran: sensor

de presión y RPM de centrífuga de entrada y salida, nivel de TUB, sensor de válvula de entrada y sensor de densidad nuclear. Todos los sistemas nombrados anteriormente se encuentran escalados y filtrados. Adicionalmente, se utilizan actuadores para el posicionado de la válvula de entrada, el agitador del TUB y el actuador de la centrífuga de salida. Estos sistemas poseen un control manual. Por último se encuentra el sistema de bypass. Este sistema simplemente conecta la entrada del Blender con la salida, lo que significa que no se utiliza ningún otro sistema intermedio de aditivos o mezclado. Su propósito es el de mover agua limpia sin aditivos o arena.

Capítulo 5

Implementación

Para implementar el sistema de manera satisfactoria se debe utilizar un PLC acorde a la aplicación. La elección de este depende de diversos aspectos, como la cantidad y el tipo de las entradas y salidas, buses disponibles, memoria de aplicación, etc. El PLC utilizado para el Blender se trata del PLUS+1 MC088-015, de Danfoss. Cuenta con 42 entradas, 32 salidas y 2 buses de comunicación CAN. Además, se utilizan dos módulos de expansión de entradas/salidas, necesarios para poder controlar válvulas, actuadores y leer entradas. Los módulos de expansión utilizados son el IX024-010 y el IOX024-020, de Danfoss.

La programación del PLC se realiza en el software PLUS+1 GUIDE y el PLUS+1 Service Tool. Los lenguajes de programación utilizados fueron ST (Texto estructurado) y FDB (Diagrama de bloques de funciones).

5.1. Estructura general

Se debe tener en cuenta ciertos aspectos para el diseño del programa. La lectura de sensores, recepción y transmisión de datos por CAN como la actualización de salidas son los triviales. Se utiliza esto para trazar un diagrama general, presentado en la Fig. 5.1.

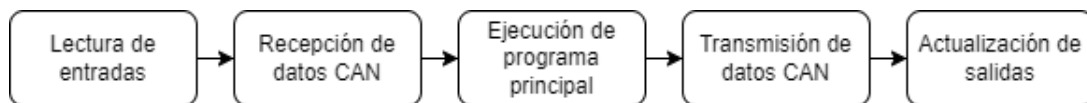


Figura 5.1: Estructura general

La lectura de entradas y actualización de salidas se puede relacionar con el módulo de entradas y salidas presentado en el Capítulo 3. Por otro lado, la recepción y transmisión de datos CAN es útil para la comunicación con el motor del equipo. La ejecución del programa principal corresponde a todas las instrucciones necesarias para operar los diferentes sistemas del Blender.

5.2. Módulo de entradas

El MC088 cuenta con 42 entradas, las cuales se dividen en:

- 6 entradas analógicas/digitales/frecuencia
- 18 entradas digitales (configurables pull-up/pull-down)
- 4 entradas digitales/analógicas
- 8 entradas analógicas/temperatura/reóstato
- 4 entradas digitales/analógicas/4-20mA
- 2 entradas analógicas/CAN shield

Se utilizan en total 22 entradas de las disponibles en el MC088. Se configuran 12 entradas analógicas para el agitador (1), tornillos (2), válvula de entrada (1), centrífuga de entrada/salida (2) y para los aditivos secos (2) y líquidos (4). Se utiliza el total de las entradas 4-20mA con el sensor de densidad nuclear (1), el sensor de nivel de TUB (1) y los sensores de caudal magnético de entrada y salida (2). Finalmente, los sensores de tipo pick up de los tornillos (2), centrífuga de entrada y salida (2) y del sistema de aditivos secos (2) utilizan 6 entradas de frecuencia.

El controlador IX024 cuenta con 18 entradas, que se dividen en:

- 7 entradas digitales/analógicas/frecuencia
- 4 entradas analógicas/temperatura/reóstato
- 6 entradas digitales (configurables pull-up/pull-down)
- 1 entrada analógica/CAN shield

Se utilizan en total 11 entradas. De ellas, 7 analógicas y 4 de frecuencia. Las analógicas se utilizan para sensores de presión de centrífuga de entrada/salida (2) y posicionamiento de la válvula de entrada (1). Mientras que las de frecuencia se utilizan para la medición de caudal por turbina (2). El resto de las entradas se dejan para posible configuración por usuario.

Por último, el expansor IOX24 cuenta con 8 entradas, configurables como:

- 5 entradas digitales/analógicas/frecuencia
- 2 entradas digitales (configurables pull-up/pull-down)
- 1 entrada analógica/CAN shield

Del total se utilizan 2 entradas digitales y 4 analógicas. Las entradas digitales corresponden a los estados de válvulas (abierta/cerrada). Por otro lado, las entradas analógicas se utilizan para los sensores de caudal correspondientes al sistema de aditivos líquidos (LAS).

5.3. Módulo de salidas

Luego de obtener todos los parámetros correspondientes, es necesario poder actuar sobre los distintos sistemas para generar la salida esperada. Para ello, se utiliza el módulo de salidas del MC088, como también el del expansor IOX24. El módulo IOX24 no cuenta con un módulo de salidas.

El MC088 cuenta con 32 salidas, de las cuales se tiene:

- 13 salidas digitales (3A MAX)
- 6 salidas digitales (6A MAX)
- 3 salidas digitales (3A MAX)/PVG
- 10 salidas digitales/PWM/PVG

Se utilizan 10 salidas de corriente (PWM) para poder actuar sobre la centrífuga de entrada/salida (2), los tornillos (2), el agitador (1) y los sistemas de aditivos secos (1) y líquidos (4).

Por otro lado, el modulo IOX024 cuenta con 8 salidas, todas configurables como digitales/PWM/PVG. De ellas, dos salidas digitales se utilizan para controlar válvulas de bypass/salida. Otra salida configurada en modo corriente (PWM) se utiliza para controlar un actuador del sistema de aditivos secos. Finalmente, se utiliza una salida de tensión (PVG) para controlar la posición de la válvula de entrada.

5.4. Sintonización de PID

Parte de los sistemas que componen al Blender tienen algún control asociado. Si bien es posible controlar el equipo desde la cabina de forma manual, no es una práctica usual. La operación del equipo de dicha forma se traduce en una gran lentitud al llevar a los distintos sistemas al punto de trabajo deseado. Por eso existe una gran ventaja al utilizar el software con controles de forma automática. La precisión y velocidad de reacción del sistema son las mas relevantes.

Para poder controlar los distintos sistemas mostrados en el Capítulo 4, se utilizan controladores PID. Estos deben ser ajustados para poder generar una acción de control acorde a la aplicación. En la Fig. 5.2 se presenta el bloque utilizado como controlador.

Los parámetros principales del bloque son TSMPL, P, I y D. Estos son el tiempo de muestreo, la constante proporcional P, la constante integral I, y la constante

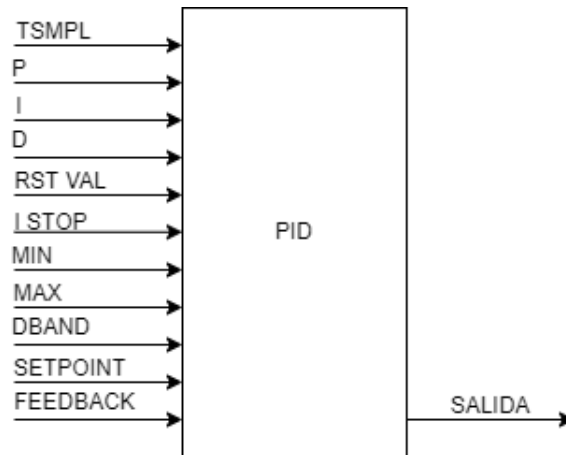


Figura 5.2: Bloque PID

derivativa D. Se tiene además un valor de reinicio, un control anti-windup con la entrada I STOP, un mínimo y máximo de salida, y un valor de tolerancia llamado DBAND. Las señales de SETPOINT y FEEDBACK se utilizan para calcular el error en el instante actual, son el valor deseado y el valor actual respectivamente.

El ajuste de todos los controladores utilizados se realizó de la misma manera. Inicialmente se aumentó la constante proporcional (P) manteniendo la constante integral y derivativa en cero. Se buscó llegar a un tiempo de respuesta adecuado y un error en régimen permanente aceptable. Luego se aumentó la constante integral (I) de modo de eliminar el error en régimen permanente. Finalmente, se incrementó la constante derivativa según el sistema lo necesite.

En el cuadro 5.1 se presentan los distintos sistemas con las constantes finales de cada uno.

Sistema	P	I	D	TSMPL
LAS 1	32767	278	20	10
LAS 2	2000	75	5	10
LAS 3	32767	350	20	10
LAS 4	32767	175	10	10
Tornillo 1	10000	100	5	10
Tornillo 2	10000	100	5	10
Centrífuga Entrada	400	35	5	20

Cuadro 5.1: Valores de controladores PID

La respuesta dada por los tornillos es similar frente a los mismos valores. Sin embargo, se puede observar una diferencia en los distintos sistemas de aditivos líquidos. Esta diferencia se da debido a distintos diseños mecánicos. En cuanto a la centrífuga de entrada, se buscó minimizar el tiempo de respuesta. También se puede observar que todos los valores de la constante derivativa son significativamente menores a los otros. Como se explicó anteriormente, este valor puede introducir comportamientos no deseados frente al ruido, por lo que se trataron de forma mas conservativa.

Los valores presentados en el cuadro 5.1 son aquellos con los que se sintoniza cada PID. Sin embargo, existen escaladores internos para las constantes. La constante P se encuentra dividida por mil, la constante I se encuentra dividida por diez mil, mientras que la constante D no se ve alterada. Por otro lado, no se utiliza el mecanismo anti-windup en ningún sistema.

5.5. Filtrado

Es inevitable que los procesos de medición no se vean afectados por ruido. Una forma de reducirlo en el sistema es mediante el uso de filtros. En la Fig. 5.3 se presenta la estructura de un filtro promedio utilizado en la mayoría de los sistemas del Blender.

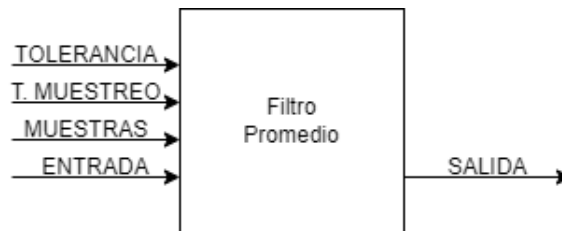


Figura 5.3: Filtro promedio

La entrada corresponde a la señal sin filtrar, mientras que la salida sera la señal filtrada. Se utilizan tres parámetros para configurar el filtro: numero de muestras, tiempo de muestreo y tolerancia. El numero de muestras corresponde a la cantidad de medidas que se utilizaran para calcular la salida en el instante actual. El tiempo de muestreo se utiliza para definir la cantidad de tiempo que se espera para obtener dos muestras consecutivas. Finalmente, la tolerancia define un valor límite absoluto para el cual el filtro deja de operar.

Todos los filtros presentes en el equipo se configuran con un valor de tolerancia nulo, con 120 muestras y con un tiempo de muestreo de 10 milisegundos.

5.6. Utilización de recursos

Un aspecto de gran importancia corresponde a la utilización de recursos del microcontrolador. El MC088-015 cuenta con un DSP de 32 bits corriendo a 150 Mhz. Tiene un total de 256 KB de memoria ROM, 2 MB de memoria no volátil y 165 KB de memoria RAM.

Tipo	Total	Sistema	Aplicación	Libre	% Utilización
ROM	262102	59422	139272	63408	69 %
RAM	167680	37322	19208	111150	15 %
NV	2000	0	416	1584	21 %

Cuadro 5.2: Utilización de recursos MC088-015

En el cuadro 5.2 se presenta la utilización de recursos. Los valores están especificados en bytes. Se puede ver la utilización de la memoria ROM al 69%, en esta se guardan las instrucciones del programa a ejecutar. Por otro lado, la memoria RAM y no volátil tienen una utilización significativamente menor. La memoria RAM se utiliza para guardar variables que el programa necesita para su funcionamiento a corto plazo. Asimismo, la memoria no volátil contiene variables que se necesita guardar aún cuando el equipo no este en funcionamiento.

Sin embargo, la razón mas importante por la cual se trabaja con PLC's Danfoss, es el bus CAN. Este bus es el utilizado por la gran mayoría de motores y transmisiones existentes hoy en día. Se integra de manera muy fácil, lo que permite controlar equipos de manera sencilla y robusta. El MC088 cuenta con dos buses de comunicación CAN2.0B, con una velocidad configurable de hasta 1.000.000 Baudios.

Uno de los buses CAN se utiliza para comunicar el motor con el PLC, mientras que el segundo bus se utiliza para poder realizar una conexión a distancia.

5.7. Control a distancia

En un pozo de fractura se trabaja con altas presiones en las cañerías. La posibilidad de controlar el equipo a la distancia es de gran conveniencia, tanto por comodidad como también por seguridad. Para poder lograrlo es necesario realizar una comunicación con la unidad de control presente en el Blender. El PLC se controla mediante la comunicación del bus CAN. Sin embargo, es poco práctico comunicarse por este protocolo a la distancia. Para poder hacerlo se utiliza un Gateway de J1939 (CAN)

a Modbus TCP. De esta forma se puede conectar una computadora a Ethernet y lograr una comunicación con la unidad de control.

El dispositivo utilizado se trata del Moxa MGate 5118-T. Funciona a través de comandos representados por una tabla de conversión. Esta tabla de conversión traduce mensajes recibidos en diferentes direcciones de la tabla, en mensajes CAN con ID específico. Por ejemplo: se define en la posición de registro de Modbus cero el envío de una trama CAN con ID 49150. El dispositivo Moxa MGate realizará el envío de la trama siempre que se reciba un nuevo valor actualizado en el registro correspondiente.

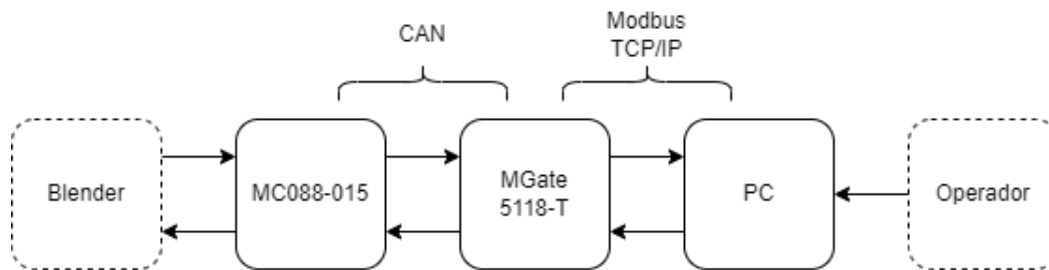


Figura 5.4: Esquema de comunicación

En la Fig. 5.4 se presenta el esquema de comunicaciones utilizado. Es importante aclarar que el operador puede ubicarse tanto en la cabina del equipo como a distancia.

Capítulo 6

Conclusión

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema de control para un Blender, financiado por la empresa metalurgica QM Equipment, ubicada en el parque industrial General Salvio, Mar del Plata. Para ello se utilizó un PLC junto a un Gateway J1939. En principio se debió estudiar el equipo y su comportamiento. También se tuvo que realizar el análisis de diferentes alternativas para la implementación.

La selección del PLC a utilizar se limitó por las características y el porte del proyecto. La necesidad de poseer cierta cantidad de entradas y salidas, como también de memoria de programa e interfaz CAN implicó el uso del PLC MC088-015 de Danfoss. Independiente al modelo a utilizar, se tuvo que estudiar la arquitectura general de un PLC, como también las distintas formas de programarlo. Esto concluyó en el uso del lenguaje estructurado y diagrama bloques de funciones, dos lenguajes de fácil uso, integrables entre ellos y de gran potencial.

La comunicación del operario con el controlador se realizó mediante Modbus TCP/IP, protocolo basado en una red Ethernet, y protocolo J1939 basado en CAN 2.0B. Si bien el protocolo J1939 presenta una robustez sustancialmente mayor, Modbus TCP/IP permite una mayor conectividad. Para lograrlo se estudió ambos protocolos en profundidad. Sin embargo, la programación del dispositivo MGate 5118 supuso ciertas dificultades debido a la baja disponibilidad de documentación.

Con el objetivo de reducir costos y optimizar el diseño, se optó por la utilización de estrategias digitales para realizar el control. Esto supuso el estudio y entendimiento de los controladores de tipo PID. Tanto en su forma analógica como digital. Sintonizar los elementos de control representa una parte crítica en la implementación del sistema. Si bien durante la etapa de diseño no se tiene en cuenta, se deben realizar pruebas para que el equipo quede en funcionamiento. Existen varios métodos para sintonizar los PID, tanto a lazo abierto como cerrado. Por políticas de la empresa y pedido de cliente la sintonización se realizó de la forma indicada en el Capítulo 5. Resultó ser una forma rápida, práctica, y precisa para sintonizar los PID.

Como consecuencia del diseño logrado, se permite personalizar de forma total el comportamiento del equipo a gusto del cliente, tanto en equipamiento como en software. Esto supone la apertura a nuevos mercados y la fidelización del control de unidades Blender para la fractura hidráulica. También permite reducir costos tanto para la empresa que lo manufactura como para el cliente, que adquiere un producto a menor precio. Todos los sistemas pueden ser programados sin la necesidad de cambiar la implementación en lo absoluto.

Bibliografía

- [1] T. R. Wanasinghe, R. G. Gosine, L. A. James, G. K. Mann, O. De Silva, and P. J. Warrian, “The internet of things in the oil and gas industry: A systematic review,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 8654–8673, 2020.
- [2] R. Barati and J.-T. Liang, “A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 16, 2014.
- [3] S. Danfoss, *Series 45 Axial Piston Pumps - Technical Information*. Sauer Danfoss.
- [4] S. Danfoss, *Series 90 Axial Piston Pumps - Technical Information*. Sauer Danfoss.
- [5] R. E. Arrieta Arvilla and F. González Kerguelen, “Tutorial básico para programación de plc,” 2003.
- [6] UNLP, “Controlador logico programable - plc.” <https://unlp.edu.ar/frontend/media/34/33734/5ec0cdabf060392904acb56348c3b8a9.pdf>.
- [7] C. M. P. MOLINA, “Controladores industriales inteligentes,” 2014.
- [8] KVASER, “Sae j1939 introduction.” <https://www.kvaser.com/about-can/higher-layer-protocols/j1939-introduction/>.
- [9] J. Cook and J. Freudenberg, “Controller area network (can),” *EECS*, vol. 461, pp. 1–5, 2007.
- [10] I. Modbus, “Modbus application protocol specification v1. 1b,” *North Grafton, Massachusetts (www.modbus.org/specs.php)*, 2006.
- [11] P. technology, “Introduction to modbus tcp/ip - prosoft-technology.com.”
- [12] A. Swales *et al.*, “Open modbus/tcp specification,” *Schneider Electric*, vol. 29, pp. 3–19, 1999.
- [13] A. M. Navarro, “Enseñanza del controlador pid digital en un microcontrolador atmega48 para una planta rc de primer orden,” in *Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora, Departamento de Ingeniería Electrónica, 11^o Congreso Nacional de Mecatrónica*, 2012.