

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**DESARROLLO DE UN CONTROLADOR AVANZADO DMC
PARA EL CONTROL DE PRESIÓN EN UN OLEODUCTO A
ESCALA DE LABORATORIO**

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería de
Control y Automatización que presenta

Jose Luis Herrera Brañes

Asesor:

Dr. Sc Raúl Rivas Pérez

Lima, 2024

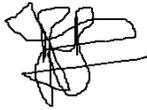
Informe de Similitud

Yo, Raúl Rivas Pérez, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada(o) “Desarrollo de un Controlador Avanzado DMC para el Control de Presión en un Oleoducto a Escala De Laboratorio”, del autor Jose Luis Herrera Brañes, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 19%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 3/06/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis no advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 3 de junio de 2024.

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Rivas Pérez Raúl	
Pasaporte: E476217	Firma 
ORCID: 0000-0002-4639-4274	

DEDICATORIA

A mis amados padres, Bilha y Gilbert, quienes siempre han estado a mi lado brindándome su incondicional apoyo.

A mi abuelito Emilio, por su amor y sabiduría.

A mi abuelita Avelina, por sus consejos y cariño.

A mis mascotas, por acompañarme siempre con su lealtad incondicional.



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a los que hicieron posible el desarrollo de este proyecto de tesis:

A mi asesor, Dr. Sc Raúl Rivas Pérez, por su guía experta, apoyo constante y valiosos conocimientos en el campo del control avanzado. Sus sugerencias y comentarios fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco también a la PUCP por el apoyo para realizar este proyecto. Su acceso a laboratorios y equipos contribuyeron significativamente a los resultados obtenidos.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todos los investigadores y académicos cuyas obras y contribuciones sentaron las bases teóricas y conceptuales para este estudio.



ÍNDICE

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	15
Problemática actual	15
Objetivo general	16
CAPITULO I. Estado del arte de los sistemas de control de oleoductos.....	17
1.1 Introducción	17
1.2 Caracterización de los oleoductos.....	17
1.2.1 Componentes de los oleoductos:.....	17
1.2.2 Componentes de las instalaciones y estaciones de bombeo:.....	18
1.2.3 Componentes de los Sistemas de control.....	19
1.2.4 Tipos de ductos	19
1.2.5 Materiales utilizados en los ductos	21
1.2.6 Aspectos técnicos y de diseño de los oleoductos.....	21
1.3 Estado del arte del modelado de fluidos en oleoductos.....	22
1.4 Estado del arte de los sistemas de control de oleoductos	22
1.5 Conclusiones	30
CAPITULO II. Identificación del comportamiento dinámico de la presión en un oleoducto	31
2.1 Introducción	31
2.2 Principio de funcionamiento de los oleoductos.....	31

2.2.1	Importancia del correcto funcionamiento de los oleoductos	31
2.2.2	Transporte del petróleo	31
2.3	Descripción de la planta piloto de transporte de fluidos de la PUCP.....	31
2.4	Componentes de la planta piloto de transporte de fluidos de la PUCP	32
2.4.1	Sensor transmisor de flujo	32
2.4.2	Sensor transmisor de presión	32
2.4.3	Electrobomba centrifuga.....	33
2.4.4	Variador de velocidad.....	33
2.4.5	Panel HMI.....	33
2.4.6	Controlador principal.....	33
2.4.7	Controladores locales.....	33
2.4.8	Switch de red.....	34
2.4.9	Diagramas de control del tablero de mando.....	34
2.4.10	Diagrama de instrumentación y tuberías “P&ID” de la planta piloto.....	35
2.5	Identificación del comportamiento dinámico de la presión en el ducto de la planta piloto .	36
2.5.1	Modelado matemático del proceso de transporte de combustible	36
2.5.2	Modelado basado en técnicas de identificación de sistemas	37
2.5.3	Identificación de la presión en un oleoducto	37
2.5.3.1	Análisis de linealidad	37
2.5.3.2	Identificación paramétrica y no paramétrica.....	39
2.5.3.3	Generación de la señal PRBS.....	40
2.5.3.4	Estructuras de modelos utilizadas en identificación de sistemas	43
2.6	Selección y validación del modelo.....	44
2.7	Conclusiones	45

CAPÍTULO III. Diseño de un controlador DMC de presión en un oleoducto	46
3.1 Introducción	46
3.2 Justificación de la estrategia del control a utilizar	46
3.3 Control predictivo basado en modelo (CPBM).....	47
3.4 Elementos del control predictivo basado en modelo.....	47
3.4.1 Modelo de predicción.....	47
3.4.1.1 Modelo del proceso respuesta impulso	48
3.4.1.2 Modelo del proceso respuesta escalón	48
3.4.2 Modelo de perturbaciones.....	49
3.4.3 Respuesta libre y forzada	49
3.4.4 Función objetivo	50
3.4.5 Ley de control	52
3.5 Control de Matriz Dinámica (DMC).....	52
3.5.1 Diseño del controlador DMC de la presión en un oleoducto.....	54
3.5.2 Desarrollo del algoritmo del controlador DMC en Matlab y Simulink	55
3.6 Evaluación del desempeño del controlador DMC.....	59
3.6.1 Evaluación del controlador DMC al variar los parámetros de peso δ y λ	59
3.6.2 Evaluación del controlador DMC variando el horizonte de control Nu y el horizonte de predicción ($N2$)	62
3.6.3 Evaluación del controlador DMC al variar el horizonte mínimo $N1$ y el horizonte máximo $N2$ de predicción.....	65
3.6.4 Evaluación del sistema de control considerando una perturbación en la salida del sistema.....	69
3.6.5 Evaluación del sistema de control considerando un ruido en el sistema	71
3.7 Conclusiones	71

CAPÍTULO IV. Propuesta de implementación del sistema de control diseñado	73
4.1 Introducción	73
4.2 Análisis comparativo de las respuestas temporales del sistema de control con controladores DMC vs PI.....	73
4.2.1 Diseño de un controlador PI de presión en la planta objeto de estudio	73
4.2.2 Evaluación de la respuesta del sistema de control de presión con controlador PI.....	74
4.2.3 Evaluación del sistema de control de la presión con controladores PI vs DMC	77
4.2.3.1 Evaluación del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC en condiciones normales	77
4.2.3.2 Evaluación del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando una perturbación.....	78
4.2.3.3 Evaluación del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando un ruido	80
4.3 Propuesta de implementación del controlador DMC en la planta piloto para el transporte de fluidos de la PUCP	81
4.4 Conclusiones	83
Conclusiones generales	84
Referencias bibliográficas	85
ANEXOS.....	92
Anexo 1: Código de Control_DMC_Oleoducto.m	92
Anexo 2: Código interno del Bloque Controlador_DMC en Matlab	93
Anexo 3: Código del bloque Controlador_PI en Matlab.....	95
Anexo 4: Código en texto estructurado de un AIO para la generación de la PRBS en la planta...96	
Anexo 5: Implementacion de los AIOS necesarios en Main Program para la identificación.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de los principales controladores propuestos para el control de oleoductos y gasoductos	30
Tabla 2.1. Etiquetas e instrumentos en correspondencia con el diagrama P&ID	35
Tabla 2.2. Estructuras de modelos polinomiales más utilizadas.	44
Tabla 2.3. Resultados de validación de los modelos obtenidos	45
Tabla 3.1. Pruebas realizadas para distintos valores de λ y δ del controlador DMC.....	59
Tabla 3.2. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC para distintos valores de λ y δ	62
Tabla 3.3. Pruebas realizadas para distintos valores de Nu y $N2$ del controlador DMC.....	63
Tabla 3.4. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC para distintos valores de Nu y $N2$	65
Tabla 3.5. Pruebas realizadas para diferentes valores de $N1$ y $N2$ del controlador DMC.....	66
Tabla 3.6. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC para distintos valores de $N1$ y $N2$	68
Tabla 3.7. Mejores índices de desempeño del sistema de control de presión con controlador DMC.	69
Tabla 3.8. Índices de desempeño del sistema de control de presión controlador DMC considerando una perturbación.....	70
Tabla 3.9. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC considerando un ruido	71
Tabla 4.1. Pruebas realizadas considerando diferentes valores de los parámetros del PI	75
Tabla 4.2. Índices de desempeño del sistema de control de presión con controlador PI para distintos valores de Kc y Ti	77
Tabla 4.3. Evaluación de los índices de desempeño del sistema de control de presión con controladores	78
Tabla 4.4. Evaluación de los índices de desempeño del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando una perturbación.....	80
Tabla 4.5. Evaluación de los índices de desempeño del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando un ruido	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Imagen parcial de un oleoducto.	17
Figura 1.2. Estación de bombeo de un oleoducto.	18
Figura 1.3. Panel de visualización de gráficos de una estación de bombeo.	19
Figura 1.4. Transporte de gas y petróleo desde la extracción hasta los terminales.....	20
Figura 1.5. Error de modelado del fluido. a) Modelo 2. b) Estación 1. c) Estación 2 y 3.	23
Figura 1.6. Presión y caudal del 40 % de petróleo ligero para bomba.	23
Figura 1.7. Respuestas transitorias para aperturas de 20% y 100% de la válvula de control.	24
Figura 1.8. Diagrama PI de la configuración experimental a escala de laboratorio de un sistema de control de un oleoducto	24
Figura 1.9. Análisis de rendimiento de controladores LQR-PI, GPM-PI y ZN-PI basados en LabVIEW para diferentes referencias	25
Figura 1.10. Análisis del desempeño de los controladores ZN-PID, IMC-PID y LQR-PID para el lazo de control de presión con referencia variable	25
Figura 1.11. Comparación del controlador NN y PSO para los escenarios 1 y 2 respectivamente	26
Figura 1.12. Diagrama de la arquitectura del sistema de control de presión con controlador MPC en un oleoducto	27
Figura 1.13. Diagrama de bloques general de la propuesta implementada en la fuente [38].	28
Figura 1.14. Variaciones de la presión en el nodo 7: 1 - Restricción baja; 2 - Restricción alta; 3 - Perfil óptimo de la presión del nodo 7	28
Figura 1.15. Resultados de las respuestas del sistema de control del flujo de petróleo en un oleoducto mediante un controlador de orden fraccional vs un controlador PI	30
Figura 2.1. Vista general de la planta objeto de estudio de la PUCP.....	32
Figura 2.2. Diagrama de fuerza de la planta piloto de la PUCP	34
Figura 2.3. Diagrama de alimentación de los PLC de la planta piloto	34
Figura 2.4. Diagrama P&ID de la planta objeto de estudio	35
Figura 2.5. Entrada escalón secuencial aplicado a la planta.	38
Figura 2.6. Respuesta de la planta frente a una entrada escalón secuencial.	38
Figura 2.7. Característica estática del comportamiento de la presión en la planta.	38

Figura 2.8. Dinámica del comportamiento de la presión en la zona lineal frente a una entrada escalón.....	39
Figura 2.9. Resultados de validación del modelo no paramétrico de la presión mediante Matlab.	40
Figura 2.10. Señal PRBS diseñada.....	41
Figura 2.11. Respuesta de la presión en la planta piloto con señal de entrada PRBS.....	41
Figura 2.12. Señal PRBS y respuesta de la presión de planta piloto, después del tratamiento de datos.	42
Figura 2.13. Datos utilizados para la obtención del modelo.	42
Figura 2.14. Datos utilizados para la validación del modelo.	43
Figura 2.15. Resultados de la validación cruzada de los mejores modelos ARX, ARMAX, BJ y OE obtenidos.	44
Figura 2.16. Respuesta temporal del modelo ARMAX de la presión frente a la señal PRBS.	45
Figura 3.1. Modelo del proceso respuesta impulso.....	48
Figura 3.2. Modelo del proceso respuesta escalón.....	49
Figura 3.3. Respuesta libre y forzada	50
Figura 3.4. Trayectorias de referencia interna.....	51
Figura 3.5. Respuesta escalón obtenida en base al modelo ARMAX del oleoducto obtenido en (2.20).	54
Figura 3.6. Diagrama de bloques del controlador DMC en Simulink.	56
Figura 3.7. Asignación del periodo de muestreo al controlador DMC.	58
Figura 3.8. Diagrama del bloque del oleoducto a escala de laboratorio.	58
Figura 3.9. Configuración del bloque de Simulink encargado del tiempo de simulación.	59
Figura 3.10. Primera prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.....	60
Figura 3.11. Segunda prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.	60
Figura 3.12. Tercera prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.	60
Figura 3.13. Cuarta prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.....	61
Figura 3.14. Quinta prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.	63
Figura 3.15. Sexta prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.	63
Figura 3.16. Séptima prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.	64
Figura 3.17. Octava prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.	64

Figura 3.18. Novena prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.....	66
Figura 3.19. Décima prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.....	66
Figura 3.20. Onceava prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.	67
Figura 3.21. Doceava prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.	67
Figura 3.22. Respuesta del sistema de control de presión con el controlador DMC ajustado en base a los parámetros seleccionados.....	69
Figura 3.23. Respuesta del sistema de control de presión con controlador DMC considerando una caída de presión en la salida del sistema de 0.05 bar.	70
Figura 3.24. Respuesta del sistema de control de presión con controlador DMC considerando una caída de presión en la salida del sistema de 0.1 bar.	70
Figura 3.25. Respuesta del sistema de control de presión con controlador DMC considerando un ruido.	71
Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema de control de presión en Simulink con controladores DMC y PI.	73
Figura 4.2. Primera prueba para la obtención de los parámetros del PI.....	75
Figura 4.3. Segunda prueba para la obtención de los parámetros del PI.....	75
Figura 4.4. Tercera prueba para la obtención de los parámetros del PI.	76
Figura 4.5. Cuarta prueba para la obtención de los parámetros del PI.....	76
Figura 4.6. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control con controladores PI vs DMC sin ruido.	78
Figura 4.7. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores.....	79
Figura 4.8. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores.....	79
Figura 4.9. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando un ruido.	80
Figura 4.10. Arquitectura OPC	81
Figura 4.11. Diagrama de bloques propuesto para la comunicación de Matlab (PC) con el servidor OPC.	82

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un controlador de matriz dinámica (DMC) para el control de presión, en una planta piloto a escala de laboratorio para el transporte de fluidos que emula el comportamiento dinámico de un oleoducto, el cual posibilita aumentar la efectividad del sistema de control, así como reducir las roturas de los ductos, las fugas y los daños al medio ambiente. Se realiza una revisión del estado del arte de los sistemas de control de presión en oleoductos. Se efectúa la descripción de la planta piloto para el transporte de fluidos de la PUCP y la identificación del comportamiento dinámico de la presión en esta planta. Se diseña el controlador DMC en base al modelo matemático derivado, además se generan acciones de control y se realizan simulaciones para evaluar el desempeño del sistema. Se realiza un estudio comparativo para analizar la robustez y eficiencia del controlador DMC desarrollado vs PID. Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que el controlador DMC diseñado exhibe un buen desempeño en el control de la presión en la planta objeto de estudio y, por consiguiente, constituye una solución eficiente y confiable para el control preciso de presión en oleoductos industriales reales, lo que posibilitará aumentar la eficiencia y la seguridad en el transporte de combustibles.

Palabras clave: Oleoducto, control de presión, control predictivo basado en modelo, controlador de matriz dinámica, identificación de sistemas

ABSTRACT

In this thesis, a Dynamic Matrix Controller (DMC) is developed for pressure control, in a laboratory-scale pilot plant for the transport of fluids that emulates the dynamic behavior of an oil pipeline, which makes it possible to increase the effectiveness of the control system, as well as reducing pipeline breaks, leaks and environmental damage. A review of the state of the art of pressure control systems in oil pipelines is carried out. The description of the pilot plant for the transport of fluids and the identification of the dynamic behavior of the pressure in this plant is developed. The DMC controller is designed based on the derived mathematical model, control actions are also generated and simulations are carried out to evaluate the performance of the control system. A comparative study is carried out to analyze the robustness and efficiency of the developed DMC vs PID controller. The results of the simulations carried out show that the designed DMC controller exhibits good performance in pressure control of the plant under study, and therefore, it constitutes an efficient and reliable solution for precise pressure control in real industrial oil pipelines, which will make it possible to increase efficiency and safety in oil transportation.

Keywords: Oil pipeline, pressure control, model predictive control, dynamic matrix controller, system identification

ACRÓNIMOS

API	Instituto Americano del Petróleo
ARMAX	Media Móvil Autorregresiva con Entrada Exógena
ARX	Autorregresiva con Entrada Exógena
BJ	Box-Jenkins
CPBM (MPC)	Control Predictivo Basado en Modelo
DMC	Controlador de Matriz Dinámica
GPM	Margen de Fase y Ganancia
HMI	Interfaz Humano-Máquina
IAE	Integral de Error Absoluto
IMC	Control por Modelo Interno
ISE	Integral de Error al Cuadrado
ISO	Organización Internacional de Normalización
ITAE	Integral de Tiempo-Error Absoluto
ITSE	Integral de Tiempo-Error al Cuadrado
IoT	Internet de las Cosas
LAN	Red de Área Local
LMPC	Control Predictivo Basado en Modelo Lineal
LQR	Regulador Cuadrático Lineal
MAOP	Presión de Funcionamiento Máxima Admisible
MLNN	Red Neuronal Multicapa
NN	Red Neuronal
OE	Error de Salida
OPC	OLE para Control de Procesos
P&ID	Diagrama de Tuberías e Instrumentación
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLC	Controlador Lógico Programable
PRBS	Secuencia Binaria Pseudoaleatoria
PSO	Optimización por Enjambre de Partículas
PTP	Procesos de Transporte de Petróleo
PUCP	Pontificia Universidad Católica del Perú
RANS	Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds
ROW	Derecho de Paso
SCADA	Control de Supervisión y Adquisición de Datos
WAN	Red de Área Amplia
ZN	Ziegler Nichols

INTRODUCCIÓN

El petróleo, un recurso de vital importancia en la estrategia de cada país, constituye el cimiento de las economías industriales modernas. En tiempos recientes, los precios del crudo han fluctuado de manera significativa debido a eventos clave, como la tensión entre Rusia y Ucrania [1].

El transporte de diversos líquidos a través de oleoductos es un método fundamental que se ha propagado globalmente debido a su eficaz capacidad para trasladar grandes volúmenes de fluidos en cortos lapsos de tiempo. Se calcula que hay una extensa red de más de 190,500 millas de oleoductos distribuidos por cerca de 114 naciones [2].

A nivel mundial, se ha proyectado que a principios de 2023, habrá aproximadamente 114,403 millas de oleoductos planificados o en construcción. De este total, 75,332 millas corresponden a proyectos en fases de planificación, ingeniería y diseño, mientras que 39,071 millas se hallan en distintas etapas de construcción [3].

Ante los riesgos de fallos y las severas implicaciones ambientales y económicas que conllevan, las industrias operantes en el ámbito de los oleoductos han de adherirse a rigurosos estándares de seguridad, confiabilidad y rentabilidad [4].

Es por ello que el control preciso de la presión en los oleoductos emerge como un factor vital para garantizar un transporte constante y seguro del petróleo y sus derivados. La literatura relativa a los accidentes históricos que han tenido lugar en oleoductos respalda la importancia y actualidad de este control, donde el exceso de presión ha derivado en desastres catastróficos [5], [6].

Problemática actual

El comportamiento dinámico de un oleoducto es bien complejo y se representa matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales [7]. Estas ecuaciones describen la dinámica del flujo de petróleo en el oleoducto considerando factores como la viscosidad, la densidad y la velocidad del flujo [8]. La solución de estas ecuaciones mediante métodos convencionales resulta muy difícil, lo que dificulta el desarrollo de controladores con elevado desempeño de los oleoductos [9].

Los PID se utilizan ampliamente en la industria del petróleo en el mundo [10]. Ello se debe a que son fáciles de entender por los operadores, tienen una implementación sencilla y ofrecen un control satisfactorio en muchos casos [11]. Sin embargo, en procesos con comportamientos dinámicos complejos, los PID no son suficientes, por lo que se precisa de otras clases de controladores [12],

[13].

Para el control con alto desempeño de procesos complejos, se utilizan los controladores avanzados como el CPBM (por sus siglas, Control Predictivo Basado en Modelo) [14]. Este enfoque emplea un modelo matemático del proceso para realizar predicciones sobre el comportamiento dinámico futuro y generar las señales de control efectivas, lo que permite un control más preciso de las variables relevantes del proceso [15], [16].

Para el funcionamiento efectivo de los oleoductos se requiere controlar el flujo y la presión [17]. En la mayor parte de los oleoductos la presión se controla mediante PID, lo que resulta en un control ineficiente debido a la compleja dinámica de estos procesos [18]. Esta clase de estrategia de control puede ocasionar consecuencias negativas, como sobrepresiones que pueden causar daños en los ductos y fugas de petróleo, así como otros problemas de funcionamiento, seguridad y de daños al medio ambiente [19]. Por consiguiente, resulta necesario implementar controladores avanzados, como por ejemplo el DMC (por sus siglas, Controlador de Matriz Dinámica) [14].

Hipótesis

Es viable realizar un control con alto desempeño de la presión en un oleoducto mediante la aplicación de un controlador DMC.

Objetivo general

Desarrollar un controlador DMC de presión en la planta piloto de laboratorio para el transporte de fluidos de la PUCP que posibilite controlar con elevada precisión esta variable, así como reducir las posibilidades de roturas de los ductos, de fugas de combustible, y de daños al medio ambiente.

Objetivos específicos

- Realizar un análisis del estado del arte de los sistemas de control de oleoductos.
- Obtener un modelo matemático de la dinámica de la presión en la planta piloto bajo estudio aplicando los métodos de identificación de sistemas.
- Diseñar un controlador DMC de la presión en la planta piloto bajo estudio.
- Desarrollar una propuesta de implementación del controlador diseñado.

CAPITULO I. Estado del arte de los sistemas de control de oleoductos

1.1 Introducción

En este capítulo se realiza una revisión de los oleoductos, así como también del estado del arte de los sistemas de control de esta clase de procesos. Se aborda la importancia de los oleoductos como medio de transporte efectivo y económico de combustibles a gran escala y se resaltan los desafíos asociados a su operación, particularmente al control efectivo de la presión. En la Figura 1.1 se exhibe una imagen parcial de un oleoducto [20].



Figura 1.1. Imagen parcial de un oleoducto. [20]

1.2 Caracterización de los oleoductos

Para caracterizarlos se definen los oleoductos, las instalaciones y los sistemas de control [21].

1.2.1 Componentes de los oleoductos:

Los oleoductos tienen cinco principales elementos [21],[22]:

Ductos o tuberías:

Los ductos permiten el transporte del fluido, estos pueden tener diferentes diámetros y espesores de pared, dependiendo de la capacidad de transporte requerida y las características del fluido. Dos estándares comunes son la especificación "API 5L para tuberías de conducción" e "ISO 3183 industrias del petróleo y el gas natural".

Actuadores:

Son los dispositivos instalados sobre las válvulas que abren y cierran las mismas, estos pueden ser manuales, eléctricos, neumáticos o hidráulicos.

Válvulas:

Las válvulas se utilizan para regular el flujo, existen varios tipos con propósito diferentes.

Revestimiento:

El revestimiento es crucial para los oleoductos, principalmente los protegen de la corrosión, aunque a veces, también se revisten de hormigón para protegerlas de daños mecánicos o para añadir peso (flotabilidad negativa) en ríos, arroyos o llanuras aluviales [23].

Derecho de Paso (ROW):

Es un acuerdo legal que permite a una empresa instalar, operar y mantener un oleoducto a través de terrenos privados o públicos, cede una franja de terreno específica donde se ubica el oleoducto, limitando los derechos del propietario del terreno a cambio de una compensación económica.

1.2.2 Componentes de las instalaciones y estaciones de bombeo:

En la Figura 1.2 se exhiben los componentes de una estación de bombeo de un oleoducto.

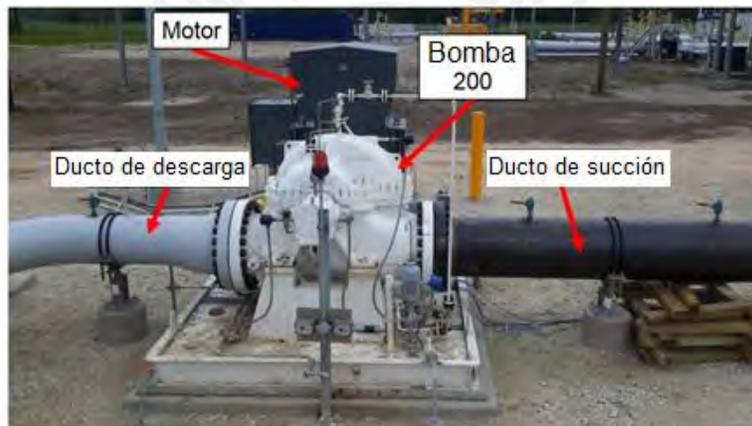


Figura 1.2. Estación de bombeo de un oleoducto. [23]

Bombas: Estos equipos se utilizan para comprimir y bombear el fluido a lo largo del oleoducto.

Motores: Proporcionan la energía para el funcionamiento de las bombas.

Medidores y equipos de calibración de medidores: Estos dispositivos se utilizan para medir el flujo a través del oleoducto, y se calibran regularmente para asegurar su precisión.

Almacenamiento: Se utilizan tanques de acero sobre el suelo y almacenamiento subterráneo de varios tipos para almacenar el fluido antes de su transporte o después de su recepción.

Tuberías y accesorios: Se requieren tuberías y accesorios para conectar los equipos y componentes entre sí y formar el sistema de transporte del oleoducto.

Elementos auxiliares: Se incluyen elementos auxiliares necesarios para respaldar el funcionamiento de los equipos principales, como sistemas de enfriamiento, sistemas de control de

fugas, sistemas de seguridad, entre otros.

1.2.3 Componentes de los Sistemas de control

En la Figura 1.3. se exhibe un panel de visualización de gráficos de una estación de bombeo.

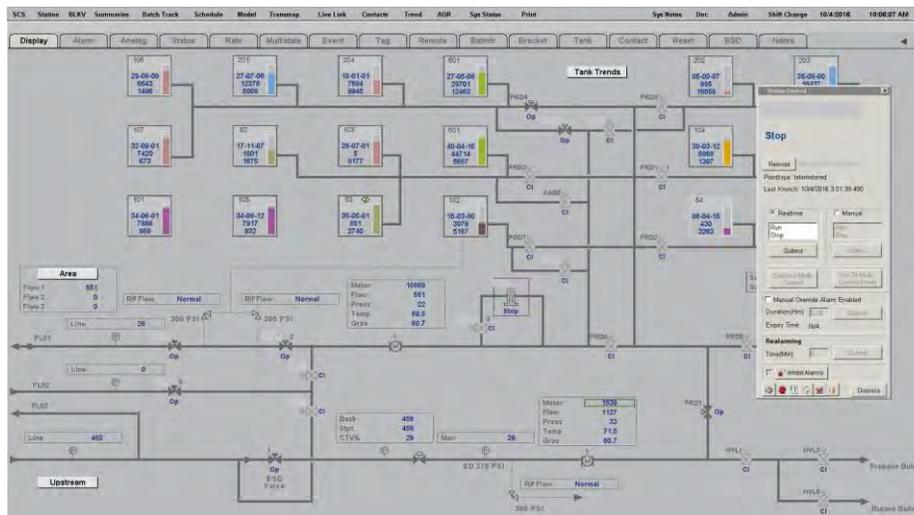


Figura 1.3. Panel de visualización de gráficos de una estación de bombeo. [21]

Instrumentos: Se utilizan para medir y monitorear diferentes variables del oleoducto, como presión, temperatura, caudal, nivel, entre otros.

Equipos de comunicación: Permiten la transmisión de información y datos entre diferentes puntos del oleoducto y las instalaciones asociadas.

Dispositivos inteligentes, pantallas y software relacionado: Los dispositivos inteligentes, como sensores y actuadores, se utilizan para recopilar datos y controlar de manera automatizada ciertos aspectos del oleoducto. Las pantallas y el software relacionado permiten la visualización de datos, para operar y monitorear el oleoducto de manera eficiente y segura.

1.2.4 Tipos de ductos

Los ductos se clasifican en diferentes clases según el tipo de fluido que transportan y su función específica (recolección, transmisión y distribución) como se muestra en Figura 1.4. En la plataforma de procesamiento tanto el petróleo como el gas son separados y transportados mediante distintos ductos, los cuales posteriormente toman nombre de oleoductos y gaseoductos respectivamente. A continuación, se describen algunos de los ductos más comunes según el tipo de fluido que transportan:

Oleoductos: Estos ductos se utilizan para transportar el combustible crudo desde los yacimientos de extracción hasta las refinerías. El combustible crudo puede tener diferentes características, como viscosidad y contenido de sulfuro, lo que requiere consideraciones específicas en cuanto al diseño y operación del oleoducto [20].

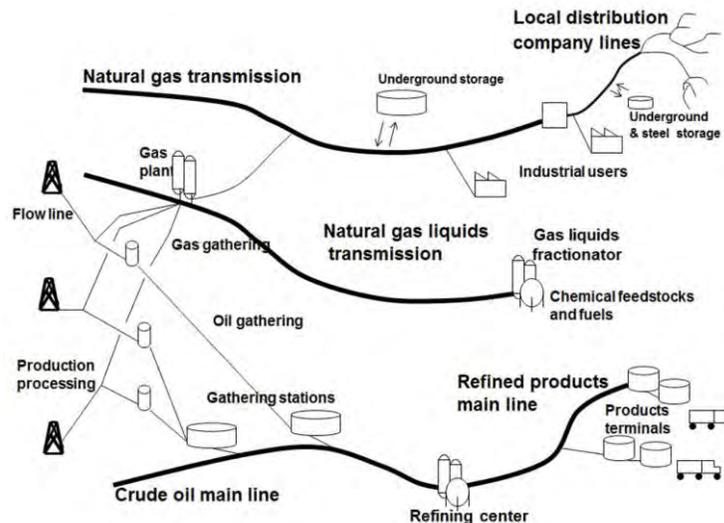


Figura 1.4. Transporte de gas y petróleo desde la extracción hasta los terminales. [21]

Ductos para productos: Estos ductos se encargan de transportar productos derivados del petróleo refinado, como gasolina, diésel, queroseno y otros combustibles. Estos ductos pueden transportar múltiples productos a la vez utilizando técnicas de agrupamiento y a menudo operan a más altas presiones que los ductos de petróleo crudo para evitar la vaporización de los líquidos [20].

Gaseoductos: Estos ductos transportan gas natural desde los yacimientos de gas hasta las estaciones de distribución o plantas de procesamiento [20]. El gas natural puede estar compuesto principalmente por metano, pero también puede contener otros componentes como etano, propano y butano.

Ductos offshore: Estos oleoductos están ubicados en aguas marinas y se utilizan para transportar petróleo crudo o gas natural desde las plataformas de extracción hasta la costa o centros de procesamiento marinos. Los ductos offshore deben ser resistentes a las condiciones marítimas [24].

Ductos bifásicos: Transportan petróleo y gas juntos en la misma tubería, lo que resulta útil cuando los volúmenes son relativamente pequeños o construir tuberías separadas es demasiado costoso [20].

1.2.5 Materiales utilizados en los ductos

En general los ductos están contruidos con una variedad de materiales que cumplen con los requisitos de resistencia, durabilidad y compatibilidad con los fluidos transportados. A continuación, se mencionan algunos de los materiales utilizados en la elaboración de los mismos [24]-[26]:

Acero: Es el material que se utiliza en la mayoría de los oleoductos. Se pueden usar diferentes grados de acero según las condiciones de operación. En [25] se mencionan a los grados X42, X46, donde el número que sigue a la X indica el límite elástico mínimo especificado del material, las resistencias más altas se utilizan para tuberías de gran diámetro.

Polietileno: Se utiliza principalmente para tuberías de distribución de gas a baja presión, debido a su flexibilidad, resistencia a la corrosión y facilidad de instalación.

Termoplásticos: Se pueden utilizar para recubrimientos externos de tuberías, proporcionando protección contra la corrosión y daños mecánicos.

Hormigón: Se emplea en revestimientos continuos para tuberías que cruzan ríos o zonas inundables, brindando protección mecánica y control de flotabilidad.

Fundición dúctil: Se puede usar en accesorios y válvulas, ofreciendo buena resistencia y ductilidad.

Aleaciones de aluminio, cobre, níquel y titanio: Se emplean en casos especiales donde se requiere alta resistencia a la corrosión o temperaturas extremas.

1.2.6 Aspectos técnicos y de diseño de los oleoductos:

Los oleoductos requieren consideraciones técnicas y de diseño específicas para garantizar su operación segura y eficiente. A continuación, se mencionan algunos aspectos técnicos y de diseño importantes en la construcción y operación de los oleoductos obtenidas de [26]:

Análisis de emergencias y eventos fuera de la normalidad: Identificación y evaluación de posibles peligros para implementar medidas de mitigación.

Capacidad y rendimiento: Determinados por el diámetro de la tubería, el espesor de la pared, la potencia de bombeo y la distancia entre estaciones.

Consideraciones ambientales: Minimizar el impacto ambiental en la selección de rutas y mediante medidas de mitigación.

Diseño sísmico: Consideraciones de diseño para resistir terremotos en zonas propensas.

Diseño de cruces: Diseños especiales para cruces de carreteras, ríos y otros obstáculos.

Diseño de terminales: Instalaciones para almacenamiento, medición y transferencia de productos.

Estudios del suelo: Determinan la profundidad de entierro y las medidas de protección necesarias.

Mantenimiento y monitoreo: Inspecciones, pruebas y reparaciones periódicas para garantizar la seguridad y la fiabilidad.

Materiales y construcción: El acero es común, pero se utilizan otros materiales como polietileno y hormigón en función de los requisitos.

Presión máxima de funcionamiento admisible (MAOP): Límite de presión crucial para garantizar la seguridad.

Propiedades del producto: La viscosidad y la presión de los gases del petróleo influyen en el diseño y los materiales de la tubería.

Pruebas hidrostáticas: Para garantizar la integridad antes de la puesta en servicio.

Recubrimiento: Los recubrimientos protegen contra la corrosión y pueden mejorar el flujo.

Topografía: Los cambios de elevación afectan la potencia de las estaciones de bombeo.

Estos son sólo algunos de los elementos que inciden en el diseño de oleoductos. El proceso implica una cuidadosa consideración de factores técnicos, medioambientales, de seguridad y económicos para garantizar un transporte fiable y seguro de petróleo crudo.

1.3 Estado del arte del modelado de fluidos en oleoductos

En [26] se presentan dos modelos de transporte de fluidos en un ducto basados en las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) promediadas por Reynolds y en la función de transferencia. Los modelos se implementaron utilizando parámetros reales de los oleoductos y se compararon con datos actuales, mostrando un buen ajuste entre la respuesta del modelo y el proceso real. El estudio concluye que ambos modelos describen con precisión la dinámica del sistema, siendo el modelo 1 más preciso y el modelo 2 más fácil de implementar y menos exigente computacionalmente. Los errores de modelado del fluido se muestran en la Figura 1.5. El autor sugiere utilizar el Modelo 2 para desarrollar el sistema de control y el Modelo 1 para analizar su desempeño.

1.4 Estado del arte de los sistemas de control de oleoductos

Esta sección se centra en el estudio del estado actual de los sistemas de control implementados en los oleoductos. Se revisan las tecnologías y metodologías empleadas para el control de la presión, la detección de fugas y la supervisión del funcionamiento de los oleoductos. Se analizan los

sistemas de control convencionales y se exploran las tendencias emergentes en el campo, como el uso de controladores CPBM e inteligentes.

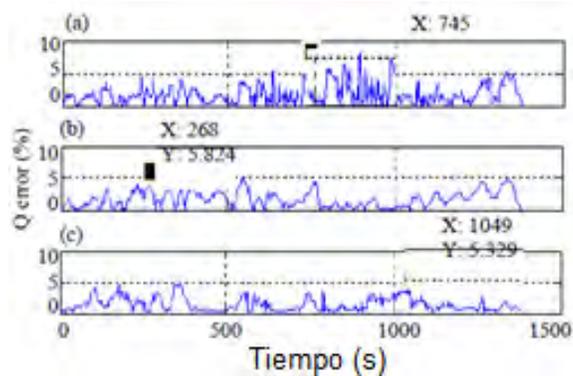


Figura 1.5. Error de modelado del fluido. a) Modelo 2. b) Estación 1. c) Estación 2 y 3. [27]

En [28] se propone un sistema para monitorear y regular la presión y el flujo en un oleoducto en tiempo real utilizando sensores y un sistema SCADA. El sistema consta de tres capas: dispositivos de campo, unidades terminales remotas, y controladores de dominio. Los datos recopilados se utilizan para enviar señales de control al PLC. En el estudio se realizan experimentos para comprobar el rendimiento del sistema en términos de presión, eficiencia y caudal de la bomba para el sistema operativo usando una tubería al cruzar la presión en la tubería con una longitud de 2 m mediante la conexión de equipos de detección de presión. Los resultados de los experimentos desarrollados se muestran en la Figura 1.6, observándose que el sistema propuesto controla la presión y flujo en el oleoducto de forma adecuada.

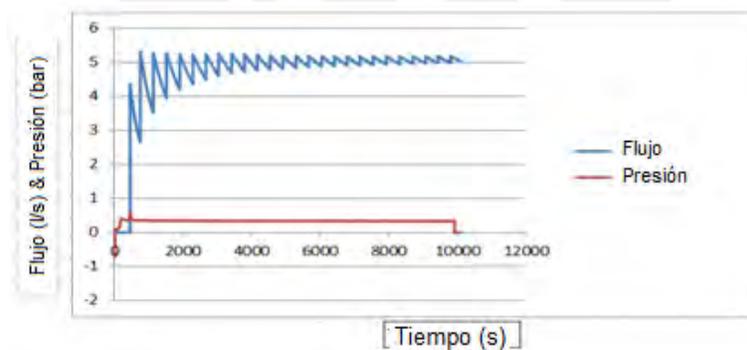


Figura 1.6. Presión y caudal del 40 % de petróleo ligero para bomba. [28]

Además, se determinó que la presión para el petróleo pesado es 0.22 bar y para el petróleo ligero es 0.23 bar. Adicionalmente, el estudio estableció que el aumento del voltaje de la bomba propició un aumento en la presión y el flujo en el ducto. El sistema de lazo abierto se obtiene utilizando LABVIEW y se desarrolla el control mediante bloques de esta plataforma.

En [29] se indica que la presión es una variable importante que se requiere monitorear y regular en los sistemas de transporte de fluidos mediante oleoductos. El documento analiza el uso de múltiples señales de presión para regular el caudal de los productos derivados del petróleo en los oleoductos de larga distancia. Se propone un controlador fuzzy-PID basado en PLC y un controlador cascada-PID basado en PLC para controlar la presión en distintos puntos del ducto con el fin de mantener el caudal deseado, como se muestra en la Figura 1.7. Se compara el rendimiento de estos controladores y se define que el controlador fuzzy-PID proporciona un rendimiento superior en la regulación del caudal con un retardo de tiempo mínimo. Los datos de presión y flujo en tiempo real se obtienen a través de una aplicación SCADA que se utiliza para determinar tendencias instantáneas mediante el registro de datos.

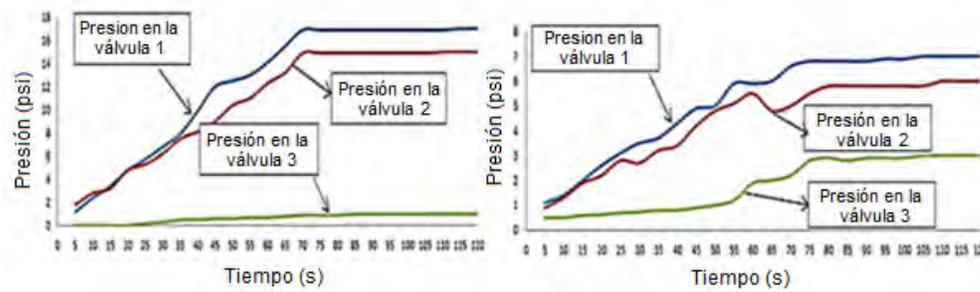


Figura 1.7. Respuestas transitorias para aperturas de 20% y 100% de la válvula de control. [29]

En [30] se propone un controlador LQR-PI basado en LabVIEW para monitorear y controlar los oleoductos (ver Figura 1.8). El controlador LQR-PI está diseñado para regular el caudal en el destino basándose en datos instantáneos en tiempo real de los parámetros controlados, como la presión y el flujo. El sistema propuesto tiene el potencial de monitorear y controlar remotamente los parámetros característicos de los oleoductos.

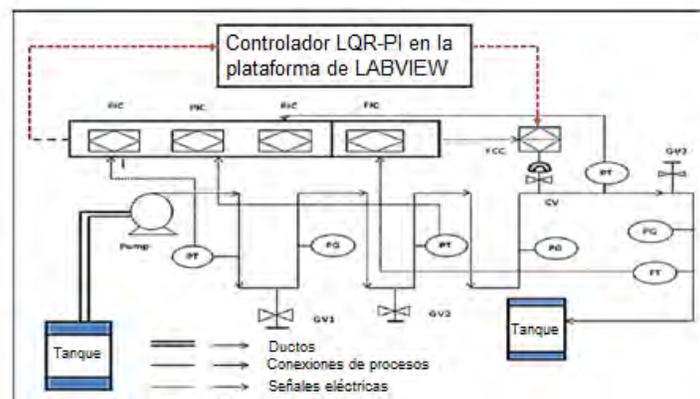


Figura 1.8. Diagrama PI de la configuración experimental a escala de laboratorio de un sistema de control de un oleoducto [30].

Este controlador se compara con un GPM-PI y ZN-PI, los cuales también fueron diseñados basados en Labview, obteniéndose las respuestas que se exhiben en la Figura 1.9.

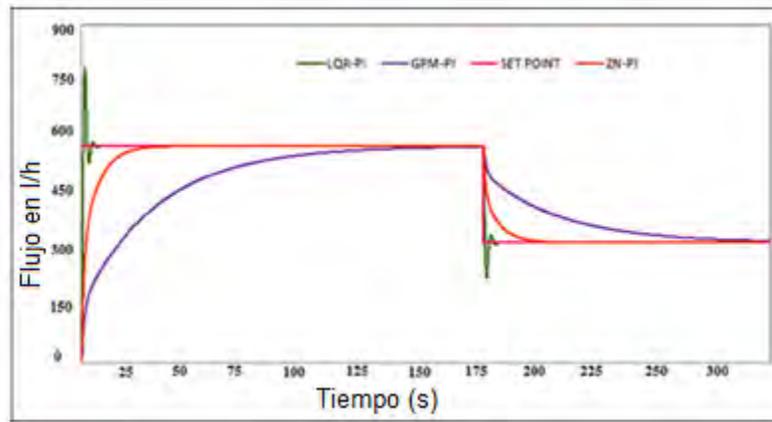


Figura 1.9. Análisis de rendimiento de controladores LQR-PI, GPM-PI y ZN-PI basados en LabVIEW para diferentes referencias [30].

En [31] se propone el uso de un controlador LQR-PID integrado por un controlador cuadrático lineal (LQR) y un controlador PID para la regulación de la presión y el flujo en una planta de transporte de fluidos. Además, se ofrece una interface IoT para identificar fugas en los ductos en una etapa temprana. El rendimiento del controlador LQR-PID se analiza y compara con controladores convencionales, como el controlador por modelo interno (IMC-PID) y el controlador ZN-PID (Zigler-Nichols) (ver Figura 1.10).

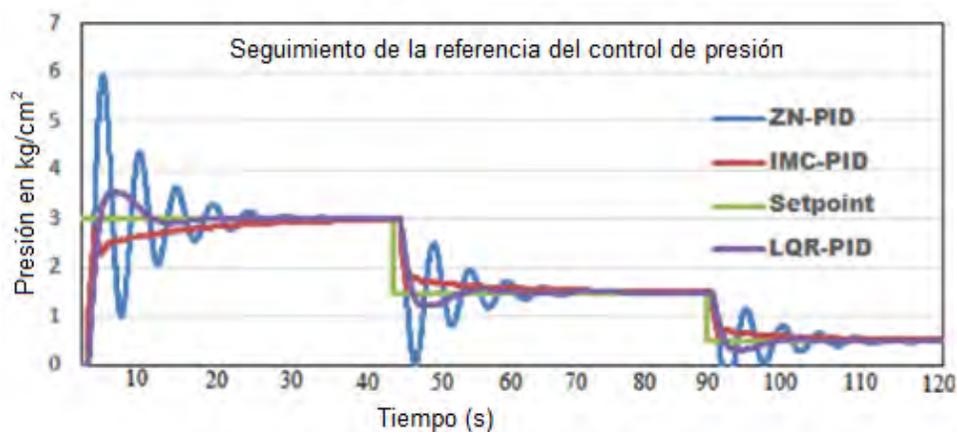


Figura 1.10. Análisis del desempeño de los controladores ZN-PID, IMC-PID y LQR-PID para el lazo de control de presión con referencia variable [31].

En [32] se aborda el control de la presión en oleoductos de crudo utilizados en sistemas de transporte terrestres. Se presenta un método que utiliza el modelo de primeros principios y el método de características para predecir el exceso máximo de presión permitido en una sección

lineal del oleoducto. El algoritmo sugiere una acción de control automático que utiliza una onda de presión en contracorriente para amortiguar los picos de presión potencialmente peligrosos.

Los resultados de las simulaciones demuestran la eficacia del algoritmo para suprimir las ondas de presión en los oleoductos causadas por diversas operaciones tecnológicas. Además, se resalta que la acción de control sugerida se puede implementar sin modificar el equipo existente en el oleoducto principal, aprovechando las capacidades de las estaciones de bombeo aguas arriba.

El MPC constituye una de las estrategias de control avanzado de mayor éxito y de amplia aplicación en diferentes procesos industriales complejos, ver, por ejemplo [33]-[35]. Estos éxitos se deben a que el MPC constituye la estrategia más general de control en el dominio del tiempo [14].

En [36] se propone un MPC en línea que utiliza redes neuronales multicapa (MLNN) para la predicción y el control de dinámicas no lineales en un gasoducto en estado transitorio. El predictor NN se encarga de predecir las dinámicas de la red de gas, mientras que el controlador NN utiliza esta información para encontrar las entradas de control óptimas, como las velocidades de rotación de los compresores, y así satisfacer las demandas deseadas. La estrategia de control propuesta se valida comparándola con otro controlador que utiliza el optimizador meta-heurístico PSO. Se realizan simulaciones en diferentes escenarios, variando los caudales de demanda, y se comparan los resultados con el controlador basado en PSO (ver Figura 1.11).

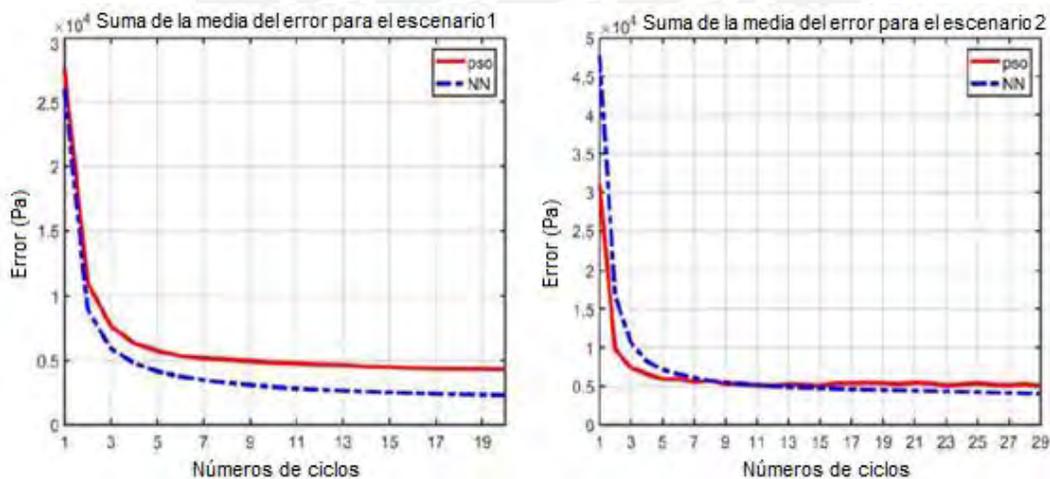


Figura 1.11. Comparación del controlador NN y PSO para los escenarios 1 y 2 respectivamente [36].

Los resultados obtenidos indican que el control propuesto funciona efectivamente en presencia de ruido y perturbaciones, lo que lo convierte en un enfoque prometedor para los gasoductos.

En [9] se presenta una estrategia MPC con modelos lineales (LMPC) gasoductos a gran escala. La

estrategia implica la derivación de un modelo no lineal de un ducto utilizando balances de masas y la ecuación de estado. Los modelos de orden reducido se construyen usando argumentos de descomposición a escala de tiempo debido a la naturaleza mal condicionada del modelo de orden completo. El primer modelo de orden reducido se utiliza para representar la planta en simulaciones de lazo cerrado, y la dimensión de este modelo se reduce aún más para obtener el modelo lineal utilizado para el diseño de LMPC. El controlador LMPC se formula para controlar ciertas presiones de tuberías mediante la manipulación de los puntos de ajuste de producción de plantas criogénicas de separación de aire. Tanto las variables de entrada y de salida están sujetas a restricciones operativas, y se investigan tres métodos para manejar las inviabilidades de la restricción de salida. En [37] se propone un MPC de presión en una estación de bombeo de un oleoducto (Figura 1.12).

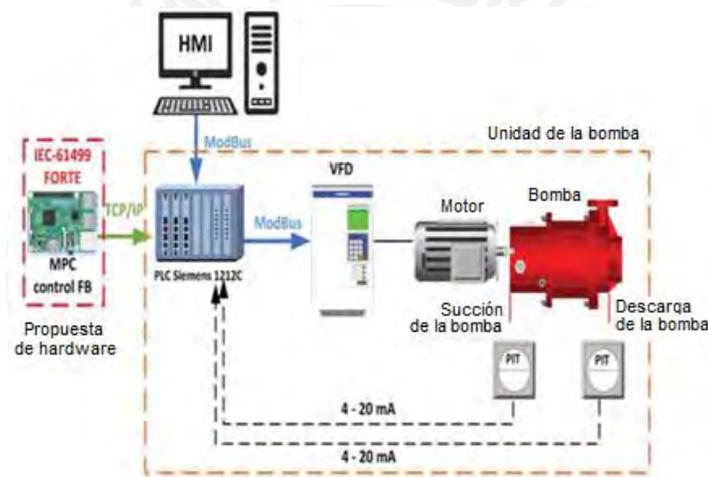


Figura 1.12. Diagrama de la arquitectura del sistema de control de presión con controlador MPC en un oleoducto [37].

El sistema se basa en la norma IEC-61499, que promueve el control distribuido basado en el desarrollo de Bloques de Función genéricos (FBs). Los FBs están programados en cualquier lenguaje de programación de alto nivel, lo que permite el fácil desarrollo de algoritmos de control complejos, algoritmos de comunicación encapsulando protocolos y funciones de interacción física. El sistema propuesto utiliza una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3B para supervisar el algoritmo de control MPC y el intercambio de datos con el PLC. El modelo del proceso se identificó utilizando datos reales del oleoducto Petroecuador. El controlador se probó en un entorno real, logrando un alto nivel de eficiencia y anulando los efectos de perturbaciones.

En [38] se plantea el uso de controladores MPC para sistemas de transporte de líquidos mediante ductos. El estudio involucra un modelo basado en la física y en las leyes termodinámicas, utilizando

MATLAB como entorno de desarrollo. Se proponen 3 estrategias de MPC y se evalúan sus desempeños mediante un modelo de ducto no lineal. Los resultados obtenidos muestran que el controlador centralizado con un método antiwindup es el que logra el mejor rendimiento entre las tres configuraciones utilizadas (ver Figura 1.13). Las variables controladas son la presión aguas abajo de cada sección del ducto y el nivel de líquido de cada tanque de almacenamiento, los cuales se controlan manipulando la caída de presión en las posiciones de las bombas y válvulas, respectivamente. El control propuesto muestra un desempeño mejorado en comparación con trabajos anteriores, con menor un IAE y sobre impulso.

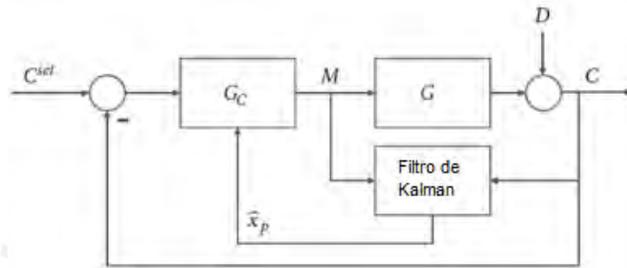


Figura 1.13. Diagrama de bloques general de la propuesta implementada en la fuente [38].

El control óptimo ha sido utilizado en diversos procesos con resultados satisfactorios, ver, por ejemplo [39], [40]. En [41] se ofrece una revisión del estado del arte de los problemas de optimización de los sistemas de transporte de gas natural. En [42] se desarrolla un algoritmo para el control óptimo de un gasoducto con cualquier configuración basada en el control jerárquico y la descomposición del gasoducto. El algoritmo divide el gasoducto en tres subsistemas y resuelve problemas locales mediante una técnica de gradiente. Los subsistemas se coordinan utilizando el método de “buena coordinación” para encontrar el óptimo general. Además, se incluye la formulación de una ecuación de estado discreta para el caso en el que las presiones de salida sean tratadas como elementos del vector de control (ver Figura 1.14).

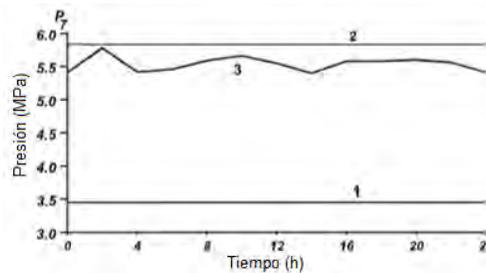


Figura 1.14. Variaciones de la presión en el nodo 7: 1 - Restricción baja; 2 - Restricción alta; 3 - Perfil óptimo de la presión del nodo 7 [42].

Las investigaciones realizadas demostraron que el algoritmo desarrollado funciona correctamente,

y se comprobó la validez de la solución componiendo soluciones con las de programas de simulación ejecutados con valores de control apropiados. La discrepancia máxima no supera el 10%. Por lo tanto, se concluye que el controlador es eficiente en la regulación de gasoductos con cualquier configuración.

Los sistemas de supervisión (SCADA) en tiempo real, así como de detección, diagnóstico y aislamiento de fallos han demostrado ser efectivos en la recopilación de información, así como en la toma de decisiones de regulación y seguridad en la operación de los oleoductos [43], [44], [45].

El control adaptativo es otra de las estrategias que ha sido aplicada exitosamente en procesos con comportamientos dinámicos complejos (ver [46]-[48]). En [49] se propone un controlador adaptativo de presión en un ducto obteniéndose resultados satisfactorios.

Han sido desarrollado modelos matemáticos basados en leyes termodinámicas y primeros principios para describir el comportamiento dinámico de los oleoductos, lo cual ha permitido formular estrategias de control avanzado y evaluar el rendimiento de los controladores propuestos [50], [51].

En los últimos años se están aplicando con éxitos los controladores de orden fraccional de procesos con comportamiento dinámico complejo (ver [52]-[56]). Finalmente, en [57] se propone un regulador de orden fraccional del flujo de petróleo en el destino en un oleoducto. Mediante los métodos de identificación experimental se obtiene un modelo de segundo orden con un cero y un tiempo muerto variante en el tiempo. Se diseña el controlador en base a un margen de fase nominal y error cero de estado estacionario, junto con una amortiguación robusta expresada en términos de una variación máxima permitida del margen de fase. Se compara el desempeño de los controladores de orden entero y fraccionario y se muestra que los controladores PI a menudo producen sistemas de lazo cerrado de fase no mínima no deseados, lo cual se puede evitar utilizando controladores de orden fraccional (ver Figura 1.15).

En Tabla 1.1. se exhibe un resumen de los principales controladores propuestos para el control de presión y flujo en oleoductos y gasoductos. De esta tabla se observa que han sido propuestos diversos controladores. El control MPC es una de las estrategias que ha mostrado mejores resultados, no obstante, el control preciso de la presión aún no ha sido completamente resuelto debido a la elevada complejidad dinámica de los oleoductos y gasoductos [58]. Por ende, la solución exitosa de este problema representa un reto.

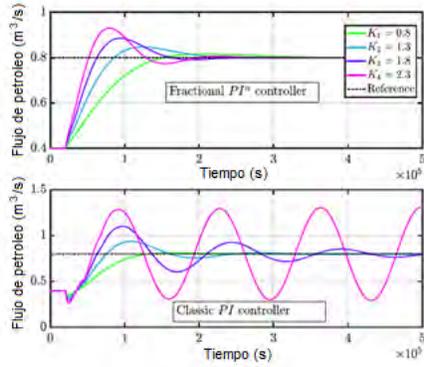


Figura 1.15. Resultados de las respuestas del sistema de control del flujo de petróleo en un oleoducto mediante un controlador de orden fraccional vs un controlador PI [57].

Tabla 1.1. Resumen de los principales controladores propuestos para el control de oleoductos y gasoductos

Autores	Variables involucradas	Tipo de Control	Fluido
Osiadaz et al. (2016)	Presión	Gradiente Óptima	Gas
Priyanka et al. (2018)	Presión y Flujo	Fuzzy PID y Cascada PID	Petróleo
Garcia et al. (2018)	Presión	MPC-Raspberry	Petróleo
Pourland et al. (2019)	Presión	Predictor MLNN	Gas
Cardenas et al. (2019)	Presión	MPC-Matlab	Petróleo
Hussein et al. (2020)	Presión	PLC-PID IMC-PID	Petróleo
Priyanka et al. (2020)	Presión y Flujo	ZN-PID LQR-PI	Petróleo
Priyanka et al. (2020)	Presión y Flujo	LQR-PID	Petróleo
Feliu, Gharab y Rivas (2023)	Flujo	PI Fraccional	Petróleo

1.5 Conclusiones

Se realizó una caracterización de los oleoductos y se destacó la elevada importancia de estos procesos como medio efectivo y económico de transporte de petróleo. Se realizó un estudio del estado del arte del control de oleoductos, y gasoductos, se analizaron las diversas estrategias y algoritmos que han sido propuestos para mejorar la supervisión y control de las principales variables de estos procesos, entre las que se destacan la presión y el flujo. La estrategia de control MPC ha demostrado ser prometedora en el control del transporte de combustibles mediante ductos, ofreciendo un mejor rendimiento y operatividad en comparación con otras estrategias.

CAPITULO II. Identificación del comportamiento dinámico de la presión en un oleoducto

2.1 Introducción

Se aborda la aplicación de los métodos de identificación de sistemas para la derivación de un modelo matemático que describa adecuadamente la dinámica de la presión en un oleoducto, considerando que el modelado matemático constituye la primera etapa del desarrollo de un controlador. Con este objetivo se utiliza la planta objeto de estudio [59],[60]. Aunque en esta planta los instrumentos instalados (sensores, válvulas y bombas) fueron concebidos para el transporte de agua, esta puede ser utilizada para emular el transporte de otros fluidos, por ejemplo, combustibles.

2.2 Principio de funcionamiento de los oleoductos

2.2.1 Importancia del correcto funcionamiento de los oleoductos

El correcto funcionamiento de los oleoductos es crucial para el transporte seguro y eficiente de los combustibles a gran escala [61]. Comprender su operación es fundamental para garantizar la confiabilidad, minimizar riesgos y optimizar la eficiencia de estos procesos. Ello incluye entender la mecánica de fluidos, identificar puntos de falla [62] y prevenir emergencias.

2.2.2 Transporte del petróleo

Los oleoductos generalmente constan de segmentos de ductos, estaciones de bombeo, y equipos de control e instrumentos de campo [63]. En el caso de un oleoducto, el petróleo se desplaza a través de los ductos gracias a la acción de las estaciones de bombeo [64].

2.3 Descripción de la planta piloto de transporte de fluidos de la PUCP

La planta piloto objeto de estudio, desarrollada por investigadores de la PUCP, constituye una potente instalación equipada con modernos instrumentos de medición y control, la cual ha posibilitado el desarrollo de investigaciones, ver [59], [60]. En esta tesis se utiliza esta planta con el objeto de emular el proceso de transporte de combustible en un oleoducto, de forma tal de obtener un modelo matemático adecuado de la presión en el oleoducto. Para garantizar el funcionamiento efectivo del oleoducto, se pretende diseñar un controlador MPC de presión de alto desempeño.

En la Figura 2.1 se exhibe una imagen de la planta objeto de estudio. Los instrumentos instalados desempeñan un papel crucial ya que permiten obtener datos importantes sobre el transporte de los fluidos y brindan información valiosa para el control, supervisión y toma de decisiones [65].



Figura 2.1. Vista general de la planta objeto de estudio de la PUCP.

La planta piloto está equipada con un tablero de mando que tiene un rol fundamental y proporciona una interface centralizada desde el cual los operadores pueden controlar sus diferentes variables.

El SCADA de esta planta desempeña un papel integral en el aseguramiento del transporte de fluidos de forma fiable y eficiente. La combinación de instrumentos de medición, actuación y control posibilitan la supervisión en tiempo real de la planta, lo que facilita la detección temprana de posibles problemas o fallos durante la operación. Esto contribuye a mejorar la calidad, confiabilidad y seguridad del transporte de fluidos en la planta piloto.

2.4 Componentes de la planta piloto de transporte de fluidos de la PUCP

2.4.1 Sensor transmisor de flujo

La planta dispone de 4 transmisores industriales de flujo instalados a diferentes distancias del modelo AXWO50-GA000BIFL212B-2JAI/GRN de Yokogawa y su tarea consiste en transmitir con precisión el flujo de los combustibles, permitiendo un monitoreo efectivo y control del proceso de transporte. La instalación estratégica de estos transmisores proporciona una visión completa del flujo a lo largo del ducto, facilitando la detección de variaciones o fallos. Con reconocida confiabilidad y precisión, estos transmisores aseguran la supervisión exhaustiva del flujo de los fluidos, contribuyendo a un funcionamiento eficiente y seguro del proceso de transporte.

2.4.2 Sensor transmisor de presión

La planta piloto cuenta con 4 sensores transmisores de presión industriales instalados a lo largo del ducto, los cuales tienen la función principal de medir y transmitir la presión de los fluidos, así como proporcionar datos para el control y supervisión del proceso, permitiendo detectar variaciones y anomalías en la presión. Estos transmisores, del modelo EJAS30E-JBH7N-O1CEN de Yokogawa, son conocidos por su confiabilidad y precisión, su instalación estratégica asegura la supervisión

exhaustiva de la presión de los fluidos, contribuyendo a un funcionamiento eficiente y seguro del proceso de transporte.

2.4.3 Electrobomba centrífuga

Las electrobombas centrífugas de planta piloto tienen como función impulsar los fluidos a lo largo de los ductos. La planta dispone de 2 electrobombas centrífugas, del modelo MULTI-H 404N SET/6-1.5kW de Salmson. Estas electrobombas desempeñan un papel crucial en la planta, ya que permiten mantener un flujo constante y controlado a lo largo del ducto. Su diseño centrífugo y su capacidad para aumentar la presión de los fluidos garantizan un impulso eficiente. La instalación de estas electrobombas asegura un funcionamiento efectivo y continuo del proceso de transporte, contribuyendo a la eficiencia y seguridad de la planta.

2.4.4 Variador de velocidad

Los variadores de velocidad de la planta tienen como función principal ajustar la velocidad del motor de las electrobombas centrífugas según las necesidades del proceso de transporte, optimizando el rendimiento y la eficiencia energética. La planta cuenta con 2 variadores, uno para cada electrobomba, del modelo 65L3210-IPE16-1UL1-SINAMIC de la marca SIEMENS. Su instalación garantiza un funcionamiento flexible y ajustable del proceso de transporte, lo que contribuye a una operación eficiente y segura del proceso de transporte de fluidos.

2.4.5 Panel HMI

El panel HMI táctil de la planta objeto de estudio posibilita el control y supervisión de las operaciones. El modelo instalado es Panel View Plus 7 - Estándar Terminal, 2711P-T15C22D8S, de Allen Bradley. Mediante este panel, intuitivo y de fácil manejo, el operador tiene acceso a todas las funcionalidades y visualizaciones necesarias para monitorear y controlar eficientemente la planta.

2.4.6 Controlador principal

El controlador principal es un PLC (Controlador Lógico Programable) que procesa las señales, realiza cálculos y emite comandos para operar la planta. El modelo instalado es ControlLogix 5581E - 1756-L81E de la marca Allen Bradley.

2.4.7 Controladores locales

La planta piloto tiene 4 controladores locales PLC, del modelo S7-1200, CPU 1215C, DC/DC/Rly de Siemens. Estos controladores permiten el control preciso y eficiente del proceso de transporte

de fluidos en cada tramo del ducto, garantizando un funcionamiento coordinado y seguro de la planta en su conjunto.

2.4.8 Switch de red

El switch instalado tiene 8 puertos, 24 VDC y tiene la función de conectar los equipos en red. Este switch permite establecer conexiones seguras y confiables entre los diferentes dispositivos de la red, facilitando la comunicación y el funcionamiento adecuado de la planta piloto.

2.4.9 Diagramas de control del tablero de mando

La Figura 2.2 muestra el diagrama de fuerza de la planta, donde se destacan los variadores de velocidad (VR1 y VR2) y las electrobombas centrífugas (B1 y B2). La Figura 2.3 muestra el diagrama de alimentación eléctrica de los PLC (principal y locales). Estos diagramas son fundamentales para comprender y operar eficientemente la planta piloto de transporte de fluidos.

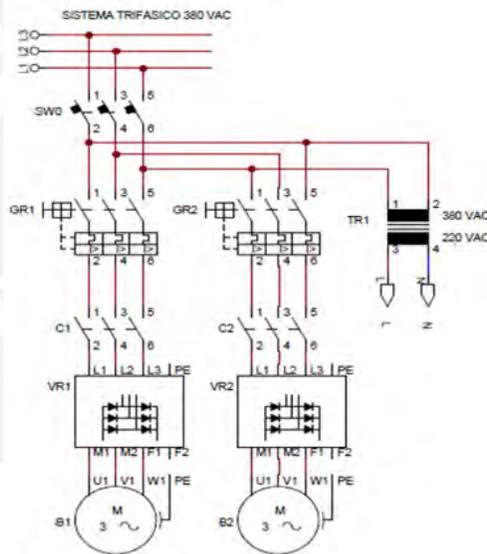


Figura 2.2. Diagrama de fuerza de la planta piloto de la PUCP [59].

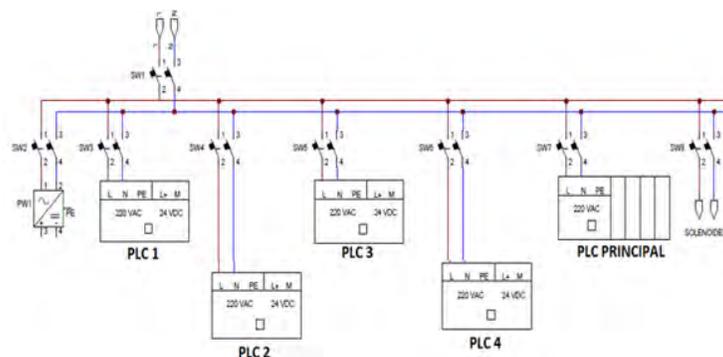


Figura 2.3. Diagrama de alimentación de los PLC de la planta piloto [59].

2.4.10 Diagrama de instrumentación y tuberías “P&ID” de la planta piloto

En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de instrumentación y tuberías P&ID de la planta piloto, diseñado según la norma ISA 5.1 "Instrument Symbols and Identification". En este diagrama se representan los instrumentos y equipos, sus funciones y el tipo de señal que utilizan para la comunicación. El diagrama muestra las electrobombas responsables de impulsar el fluido a lo largo del ducto, los transmisores de flujo y presión, junto con válvulas solenoides para simular fugas en distintas secciones de la planta. En la Tabla 2.1 se detallan los instrumentos instalados en la planta en correspondencia con el diagrama P&ID [59].

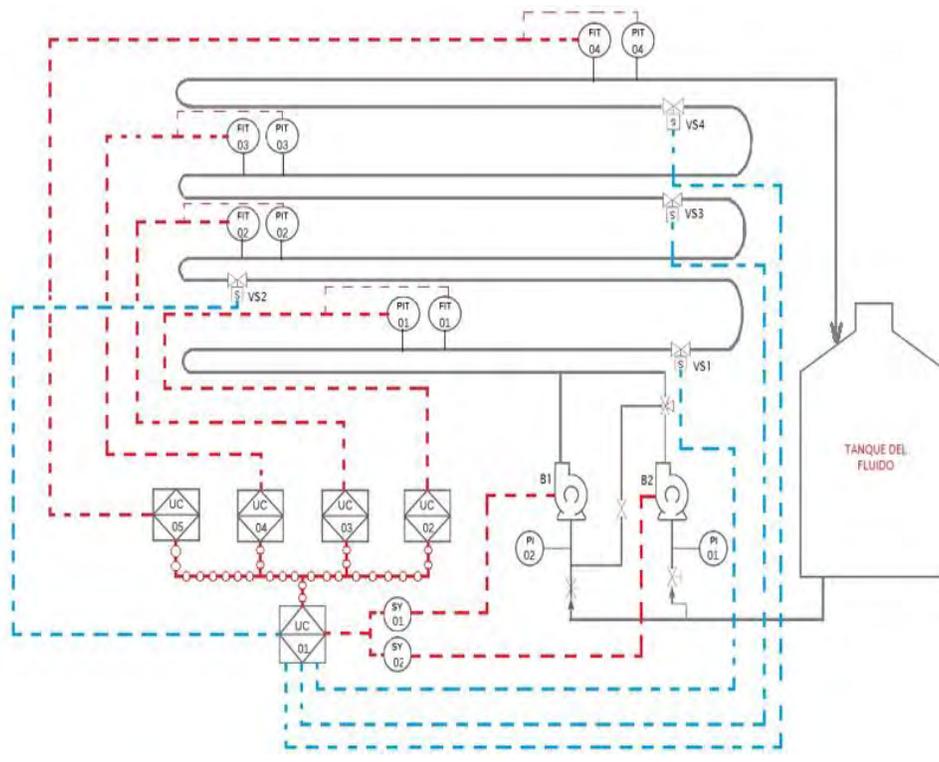


Figura 2.4. Diagrama P&ID de la planta objeto de estudio [59].

Tabla 2.1. Etiquetas e instrumentos en correspondencia con el diagrama P&ID [59].

Etiqueta	Instrumento y Función
UC – 01	Controlador principal
UC – 02	Controlador local, para tramo o segmento 01 de la tubería de transporte de fluido
UC – 03	Controlador local, para tramo o segmento 02 de la tubería de transporte de fluido
UC – 04	Controlador local, para tramo o segmento 03 de la tubería de transporte de fluido
UC – 05	Controlador local, para tramo o segmento 04 de la tubería de transporte de fluido
FIT -01	Transmisor indicador de flujo, para medir el flujo en el tramo o segmento 01.
FIT -02	Transmisor indicador de flujo, para medir el flujo en el tramo 02.
FIT -03	Transmisor indicador de flujo, para medir el flujo en el tramo 03.
FIT -04	Transmisor indicador de flujo, para medir el flujo en el tramo 04.

PIT -01	Transmisor indicador de presión, para medir la presión en el tramo 01
PIT -02	Transmisor indicador de presión, para medir la presión en el tramo 02
PIT -03	Transmisor indicador de presión, para medir la presión en el tramo 03
PIT -04	Transmisor indicador de presión, para medir la presión en el tramo 04
VS1	Válvula solenoide, para simular la fuga en el tramo 1.
VS2	Válvula solenoide, para simular la fuga en el tramo 1.
VS3	Válvula solenoide, para simular la fuga en el tramo 1.
VS4	Válvula solenoide, para simular la fuga en el tramo 1.
SY – 01	Variador de velocidad, para la electrobomba 1.
SY – 02	Variador de velocidad, para la electrobomba 2.
PI – 01	Indicador de presión, para indicar presión de salida de electrobomba 1
PI – 02	Indicador de presión, para indicar presión de salida de electrobomba 2
B1	Electrobomba centrífuga 1, para impulsar y transferir el fluido
B2	Electrobomba centrífuga 2, para impulsar y transferir el fluido

2.5 Identificación del comportamiento dinámico de la presión en el ducto de la planta piloto

La identificación de la dinámica de la presión es crucial para el control de esta variable, por ende, se explora el modelado matemático del proceso de transporte de combustible, considerando las ecuaciones y parámetros relevantes para describir el flujo y la variación de presión en el sistema. Se analizan las técnicas de identificación de sistemas para obtener modelos paramétrico y no paramétrico, de los cuales se elegirá el que muestre el mejor desempeño [65].

2.5.1 Modelado matemático del proceso de transporte de combustible

Como primera opción se evaluaron las ecuaciones de conservación de masa, conservación del momentum y la ecuación de energía respectivamente [66]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \nabla P - \rho \mathbf{g} = 0 \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \hat{U}) + \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \mathbf{v} \right) + \nabla \cdot (\rho \hat{U} \mathbf{v}) \\ + \nabla \cdot \mathbf{q} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) + \nabla \cdot (P \mathbf{v}) - \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) - \dot{G} = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Se supone que el petróleo es ligeramente compresible lo que implica que se simplifican las ecuaciones de conservación de masa y momento asumiendo que la variación de la densidad es pequeña respecto a su valor nominal, que el fluido es newtoniano (viscosidad constante) y que el flujo es unidimensional con sección transversal constante.

Considerando las simplificaciones, se obtienen las siguientes ecuaciones [7].

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda(Re, \epsilon) \frac{1}{d_0} \frac{\rho_0 |v|v}{2} - \rho_0 g \sin \alpha(x) \quad (2.5)$$

Las ecuaciones obtenidas son diferenciales parciales, las cuales analíticamente son complicadas de resolver. Además, como se utilizan simplificaciones se pierden parámetros importantes del proceso, lo cual no resulta permisible debido a que para diseñar un MPC se requiere de un modelo preciso del proceso, justificándose la necesidad de utilizar los métodos de identificación de sistemas, los cuales han sido ampliamente utilizados (ver [67], [68]).

2.5.2 Modelado basado en técnicas de identificación de sistemas

Considerando la complejidad matemática de los modelos fenomenológicos de la presión en un oleoducto, en esta tesis se utilizan los procedimientos y métodos de la identificación de sistemas para obtener dicho modelo [69].

2.5.3 Identificación de la presión en un oleoducto

El proceso de identificación de la presión en el oleoducto se realizó utilizando los datos experimentales obtenidos de la planta.

Variables medidas y controladas:

- Flujo del combustible
- Presión del combustible

Variables manipuladas:

- Velocidad de giro del motor de las electrobombas

Perturbaciones:

- Variaciones en el flujo y presión del combustible.
- Fugas de combustible.
- Suministro eléctrico deficiente, puede dañar el motor eléctrico de las bombas.
- Sobrecarga general de las bombas, puede aumentar la temperatura del motor y dañarlo.

2.5.3.1 Análisis de linealidad

El objetivo principal de este análisis es determinar si la respuesta de la planta piloto a escala de laboratorio a las variaciones de la entrada (velocidad de giro del motor de las electrobombas) es

lineal. Para ello se obtuvo la curva estática de presión, que representa la relación entre la presión y la variable de entrada. Para obtención de la misma se tuvieron en cuenta los siguientes pasos [70]:

- Introducir una señal escalón de 10% a 90% rpm, en la electrobomba (Figura 2.5).
- Medir y registrar la presión del ducto (Figura 2.6).

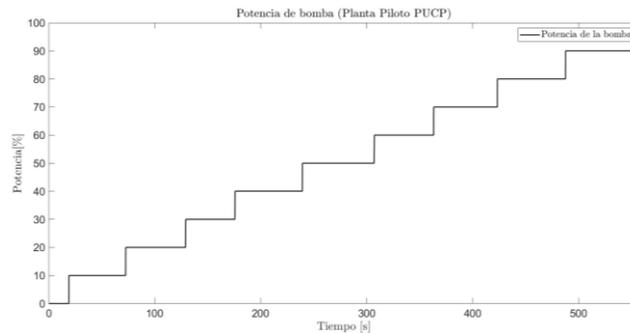


Figura 2.5. Entrada escalón secuencial aplicado a la planta.

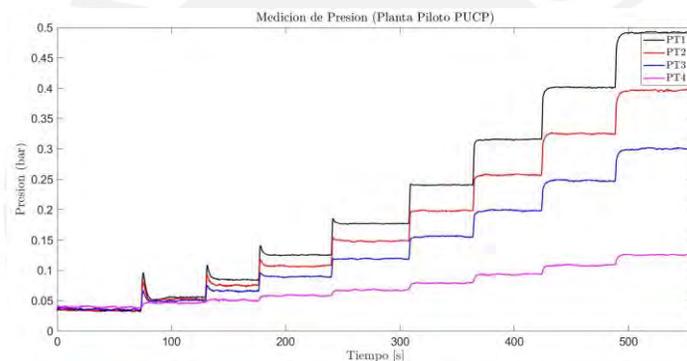


Figura 2.6. Respuesta de la planta frente a una entrada escalón secuencial.

- En base a los dos pasos anteriores se trazó una curva estática (ver Figura 2.7).

Porcentaje (%)	Presión (bar)
0	0
10	0,033
20	0,056
30	0,084
40	0,125
50	0,176
60	0,24
65	0,279
70	0,316
80	0,402
85	0,444
90	0,493

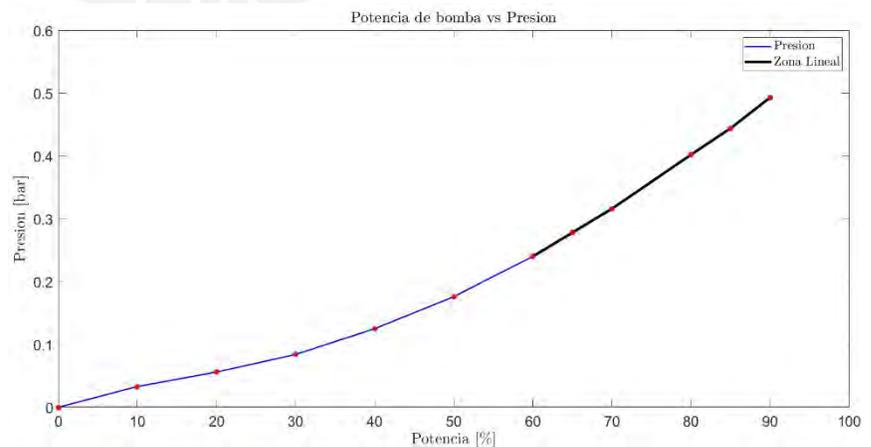


Figura 2.7. Característica estática del comportamiento de la presión en la planta.

La curva estática obtenida exhibe un comportamiento generalmente no lineal. Sin embargo, es importante destacar se identificó una zona de operación entre el 60% y el 90% de la capacidad de la bomba donde el sistema se comporta de manera lineal.

2.5.3.2 Identificación paramétrica y no paramétrica

Antes de aplicar la señal binaria pseudo aleatoria (PRBS) para la identificación paramétrica se aplicó previamente una entrada escalón en la zona lineal entre 60 % y 90 % obtenida anteriormente, lo cual sirvió como fuente de obtención de parámetros importantes como: el posible orden del modelo, el tiempo muerto y las constantes de tiempo (identificación no paramétrica). Los resultados obtenidos se exhiben en la Figura 2.8.

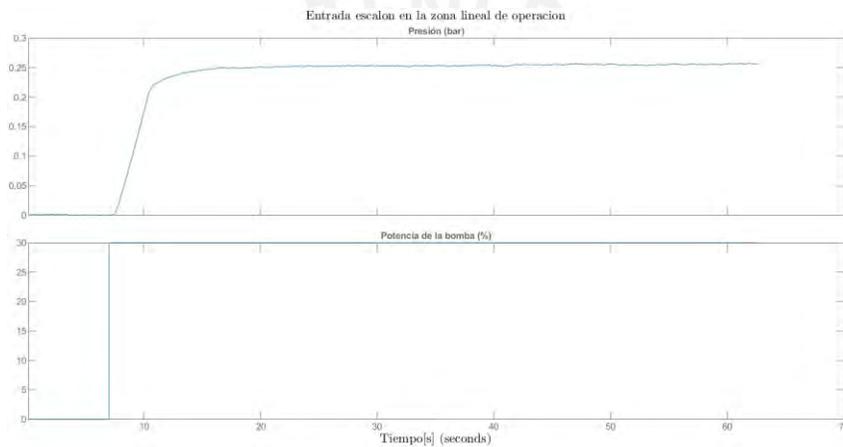


Figura 2.8. Dinámica del comportamiento de la presión en la zona lineal frente a una entrada escalón.

Se usó el toolbox de Matlab “System Identification” para generar un modelo no-paramétrico de primer o segundo orden en base a las ecuaciones (2.6) y (2.7) [71].

$$G_s = \frac{K}{1 + T_p} e^{(-T_d s)} \quad (2.6)$$

$$G_s = \frac{K}{(1 + T_{p1})(1 + T_{p2})} e^{(-T_d s)} \quad (2.7)$$

$$G_s = \frac{0.0084507}{(1 + 1.3337)(1 + 0.80971)} e^{(-0.4649s)} \quad (2.8)$$

La validación del modelo no paramétrico obtenido se exhibe en la Figura 2.9.

El modelo (2.8) se discretizó utilizando un método de aproximación que transforma la variable continua s a la variable discreta z [69], en este caso, se usó el método de Euler. Como resultado se obtuvo:

$$G(z) = z^{-5} \frac{0.0006479z^{-1}}{1 - 1.82z^{-1} + 0.828z^{-2}} \quad (2.9)$$

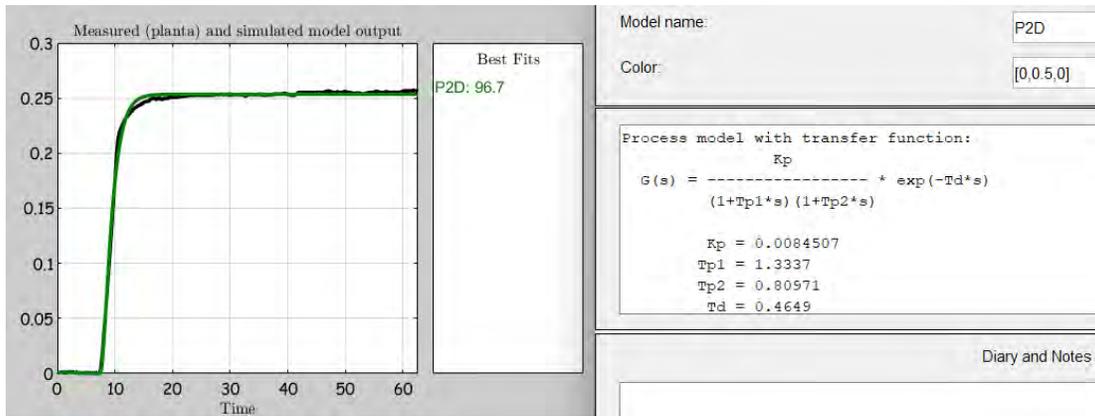


Figura 2.9. Resultados de validación del modelo no paramétrico de la presión mediante Matlab.

De estos modelos se observan características notorias, como el retardo de tiempo de 0.46 y 0.5 s, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto respectivamente, además con el comando ‘stepinfo’ de Matlab se obtuvo un tiempo de establecimiento de 7.1 s.

2.5.3.3 Generación de la señal PRBS

El periodo de muestreo para la identificación paramétrica en este experimento es de 0.1 s, ya que la regla práctica indica que el periodo de muestreo debe ser menor o igual al tiempo de establecimiento dividido entre 20, por lo tanto, se cumplió este requisito ya que es menor que 0.355 s:

$$\frac{T_{est}}{20} = \frac{7.1}{20} = 0.355 \quad (2.10)$$

La planta se excitó con una señal PRBS que es ideal para este propósito, ya que persiste en la excitación del proceso y garantiza que la matriz de covarianza sea definida positiva. La señal PRBS se caracteriza por su amplitud, período y anchos de pulso mínimo y máximo. La amplitud se seleccionó dentro de la región de operación lineal de la presión, aproximadamente entre el 65% y 85% de potencia de la bomba. Los anchos de pulsos mínimo y máximo se determinaron siguiendo las pautas establecidas en la literatura [70]:

$$T_{max} = \frac{2\pi T_s}{0.15} \quad (2.11)$$

$$\frac{2\pi T_s}{10} < T_{min} < \frac{2\pi T_s}{5} \quad (2.12)$$

$$T_{PRBS} = T_{max} + T_{min} \quad (2.13)$$

donde:

T_s : Periodo de muestreo

T_{max} : Ancho de pulso máximo

T_{min} : Ancho de pulso mínimo

T_{PRBS} : Periodo de cada pulso.

Con un tiempo de muestreo de 0.1 segundos, los parámetros definidos fueron: $T_{min} = 0.125$ s, $T_{max} = 4.1$ s y el $T_{PRBS} = 4.225$ s. En la Figura 2.10 se exhibe la señal PRBS diseñada.

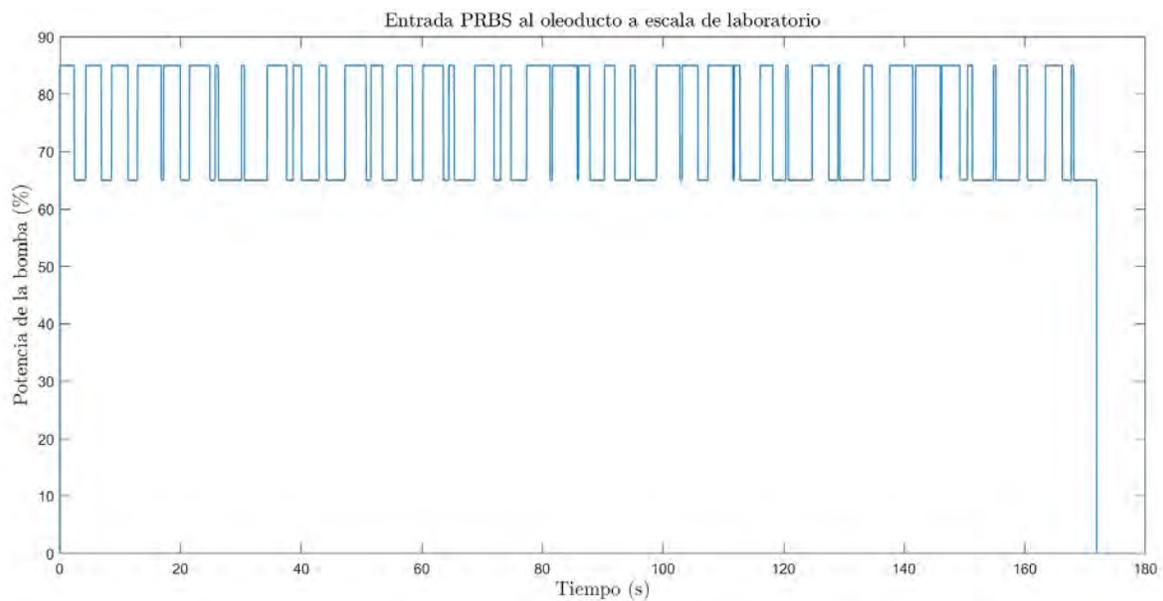


Figura 2.10. Señal PRBS diseñada.

La Figura 2.11 muestra la respuesta de la presión a la señal PRBS diseñada.

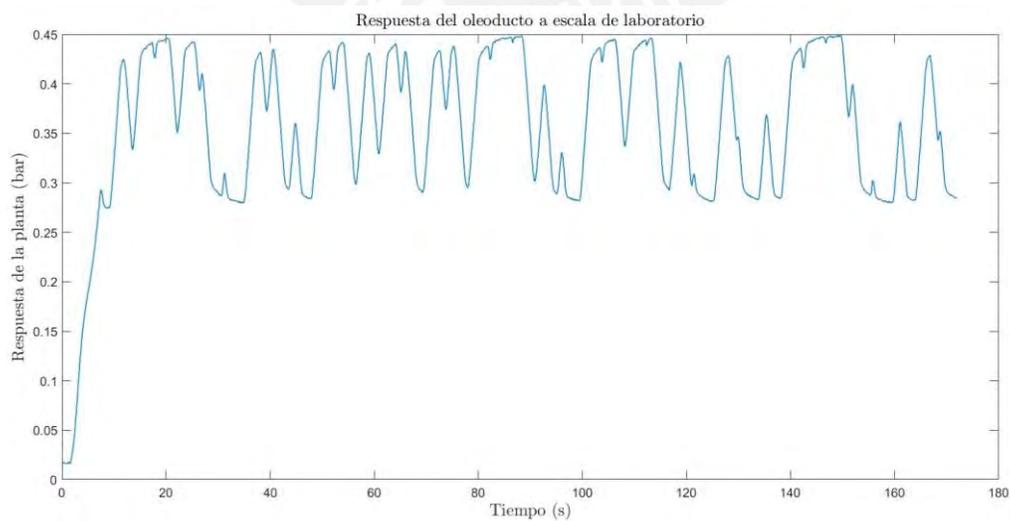


Figura 2.11. Respuesta de la presión en la planta piloto con señal de entrada PRBS.

Luego de derivar los datos experimentales, se realizó un tratamiento a los datos eliminando el offset y la media utilizando el comando detrend de Matlab, los resultados se exhiben en la Figura 2.12.

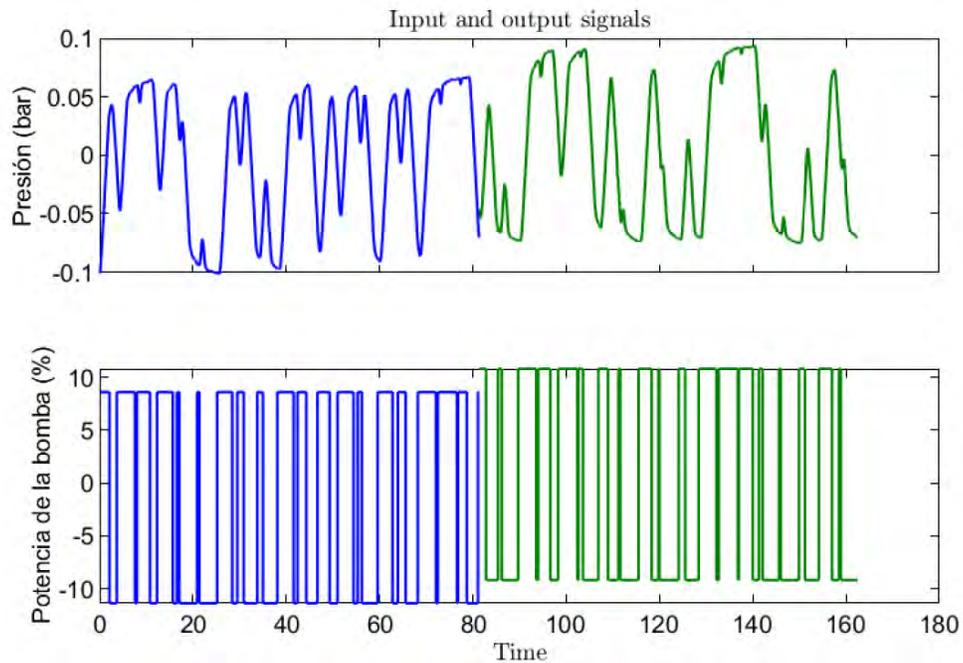


Figura 2.12. Señal PRBS y respuesta de la presión de planta piloto, después del tratamiento de datos.

La primera mitad de los datos derivados se utilizó en la obtención del modelo (ver Figura 2.13) y la otra mitad se utilizó en la validación del (ver Figura 2.14).

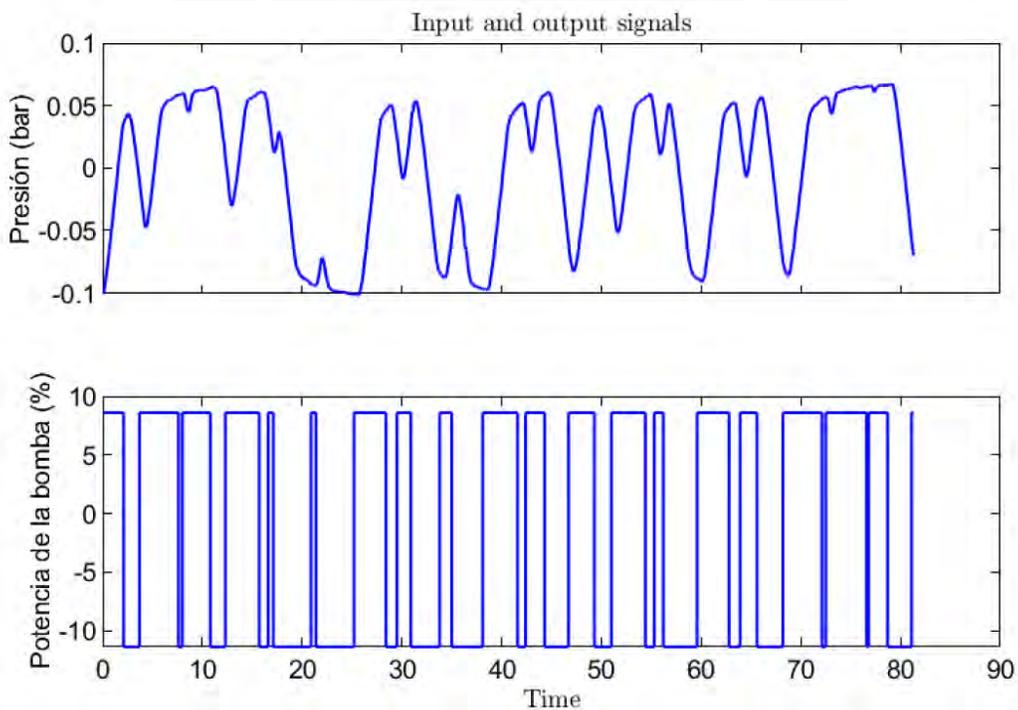


Figura 2.13. Datos utilizados para la obtención del modelo.

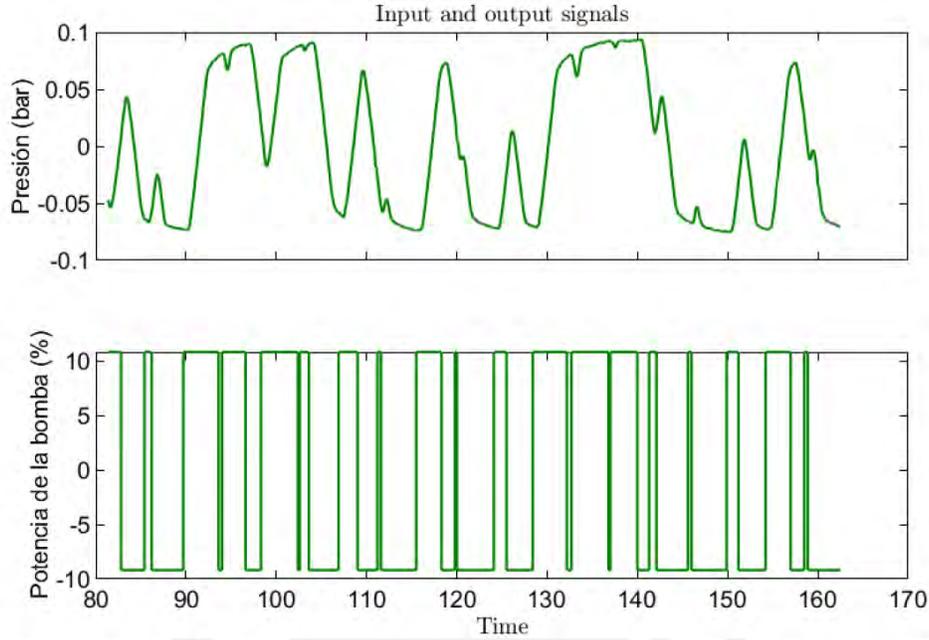


Figura 2.14. Datos utilizados para la validación del modelo.

2.5.3.4 Estructuras de modelos utilizadas en identificación de sistemas

En la literatura se reportan diversas estructuras polinomiales (ver Tabla 2.2) que pueden ser utilizadas como modelo de una planta, las cuales se representan mediante la siguiente estructura general de modelo [72]:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}q^{-k}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (2.14)$$

donde:

$u(t)$: señal de entrada;

$y(t)$: señal de salida;

$e(t)$: señal de ruido blanco.

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (2.15)$$

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \quad (2.16)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \quad (2.17)$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_{n_d}q^{-n_d} \quad (2.18)$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_{n_f}q^{-n_f} \quad (2.19)$$

n_a, n_b, n_c, n_d, n_f son los órdenes de los polinomios cuyos coeficientes se requiere identificar, mientras que k representa el retardo de tiempo del modelo.

Tabla 2.2. Estructuras de modelos polinomiales más utilizadas. [72]

Polinomios utilizados en la estructura general	Nombre de la estructura del modelo
B	FIR
AB	ARX
ABC	ARMAX
AC	ARMA
ABD	ARARX
ABCD	ARARMAX
BF	OE (output error)
BFCD	BJ (Box-Jenkins)

2.6 Selección y validación del modelo

La derivación del modelo paramétrico fue posible debido a la obtención de los datos experimentales generados por la señal PRBS, por lo que fue posible estimar modelos ARX, ARMAX, OE o BJ, y sus parámetros mediante el criterio de mínimos cuadrados. La tarea de identificar el proceso se facilitó al usar el Toolbox de identificación de sistemas de Matlab, como ha sido demostrado en otros trabajos de investigación [73], [74]. En la Figura 2.15 se exhiben los resultados de la validación cruzada de los modelos obtenidos con el mayor FIT.

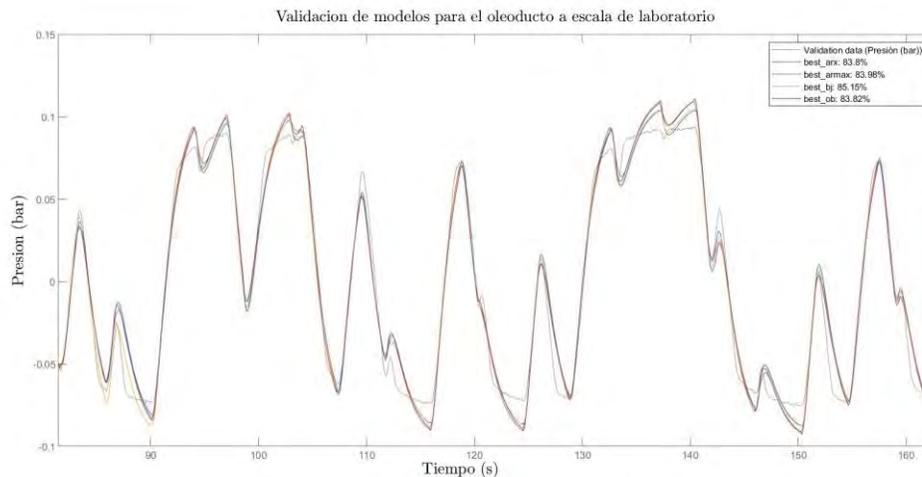


Figura 2.15. Resultados de la validación cruzada de los mejores modelos ARX, ARMAX, BJ y OE obtenidos.

Se realizó la validación de los modelos obtenidos, comparando las predicciones de estos con los datos experimentales tomando en cuenta la precisión y la confiabilidad, en la Tabla 2.3 se resume la validación del mejor modelo obtenido de cada tipo de estructura polinómica.

Tabla 2.3. Resultados de validación de los modelos obtenidos

Estructura	Orden polinomial	FIT (%)
ARX	5-5-3	83.8 %
ARMAX	3-3-1-1	83.98 %
BJ	3-1-3-4-3	85.15 %
OE	2-2-4	83.82 %

Debido a la cantidad de ceros y polos, además de un tiempo de retardo más realista se eligió el modelo ARMAX de mejor desempeño siguiente:

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} q^{-k} u(t) + \frac{C(q)}{A(q)} e(t) \quad (2.20)$$

donde:

$$A(q) = 1 - 2.484q^{-1} + 2.056q^{-2} - 0.5682q^{-3} \quad (2.201)$$

$$B(q) = (6.963q^{-1} - 29.78q^{-2} - 63.69q^{-3})10^{-6} \quad (2.212)$$

$$C(q) = 1 - 0.855q^{-1} \quad (2.223)$$

Además, se encontró que se requiere agregar una constante de 40.68% a la entrada para que el modelo se ajuste mejor a los datos del proceso real. En la Figura 2.16 se exhibe el comportamiento del modelo ARMAX utilizando los datos obtenidos con la señal PRBS con los que fue creado.

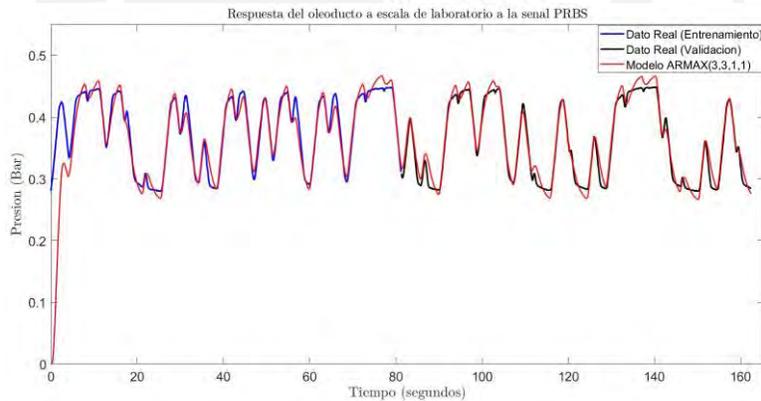


Figura 2.16. Respuesta temporal del modelo ARMAX de la presión frente a la señal PRBS.

2.7 Conclusiones

Se realizó el procedimiento de identificación del comportamiento dinámico de la presión en la planta objeto de estudio.

Como resultado se obtuvo un modelo ARMAX de 2do orden con tiempo muerto.

Los resultados de validación mostraron un aceptable grado de adecuación.

CAPÍTULO III. Diseño de un controlador DMC de presión en un oleoducto

3.1 Introducción

El control MPC constituye una potente e importante estrategia de control. En contraposición a los sistemas de control convencional, esta estrategia posibilita controlar procesos dinámicos complejos de manera efectiva. El MPC posibilita no solo mantener la presión en el oleoducto dentro de rangos seguros de operación, sino también optimizar continuamente el rendimiento del sistema de control en función de condiciones de operación cambiantes. Este capítulo, se enfoca en el desarrollo un controlador MPC basado en la estrategia DMC (Control de Matriz Dinámica) para controlar la presión de un oleoducto. Mantener la presión de operación requerida en un oleoducto es crucial para garantizar un transporte eficiente y seguro del combustible, por ello se requiere la aplicación de un controlador avanzado como el DMC.

3.2 Justificación de la estrategia del control a utilizar

La elección de la estrategia de control a implementar es un paso crítico en el proceso de asegurar un desempeño óptimo de los sistemas de control. En este contexto, la justificación de utilizar un controlador MPC se basa en consideraciones fundamentales respaldadas por investigaciones previas [75]–[77].

El control preciso de la presión en un oleoducto es una tarea complicada debido a la compleja dinámica que presenta esta clase de proceso caracterizada por exhibir comportamiento no lineal, parámetros dinámicos distribuidos y tiempo muertos variantes en el tiempo debido a las variaciones que se originan en las presiones extremas y en el flujo durante la transportación [20].

Además, las perturbaciones que se producen en un oleoducto debido a las variaciones en la presión y el flujo son comunes y frecuentes [18]. Estas perturbaciones pueden ser iniciadas por los operadores de la planta, al cambiar los puntos de operación del oleoducto, o mediante la operación automatizada de las bombas, válvulas, compresores, etc. [8].

Existen circunstancias en las que las variaciones en la presión y el flujo tienen el potencial de desencadenar una alteración sustancial del proceso de transportación del combustible [21]. Generalmente, estas situaciones requieren que se sigan procedimientos complejos, que los operadores normales pueden no contar con las habilidades para manejar [22]. En el contexto de este análisis, la naturaleza disruptiva de las variaciones repentinas en la presión y el flujo es un

tema crítico en los oleoductos [24]. Tales fenómenos pueden causar ondas de flujo desastrosas dentro de los ductos causando efectos de martilleo contra válvulas, bridas, equipos de medición, etc. [26]. En ocasiones los daños son inmediatos y catastróficos, sobre todo cuando las válvulas, bridas o ductos se rompen y se produce la subsiguiente pérdida peligrosa de combustible [27].

Actualmente, para el control de la presión en un oleoducto el controlador más utilizado es el PID. Sin embargo, es bien conocido que este controlador no es suficiente para el control de plantas con parámetros dinámicos distribuidos, retardos de tiempos variantes en el tiempo y perturbaciones significativas [11].

El interés actual de la industria en las técnicas de control avanzado [78], [79] brinda oportunidades para incrementar la eficiencia y optimización del proceso de transporte de combustibles mediante oleoductos en presencia de restricciones y perturbaciones significativas [12].

La literatura exhibe diversos métodos de control avanzado que proporcionan formas importantes de mejorar el control de los oleoductos [17]. El control MPC es una de las soluciones más exitosas para una operación eficiente y segura de los oleoductos [37]. Esta estrategia de control es de naturaleza abierta, y ha propiciado el desarrollo de investigaciones ampliamente aceptadas [14], [80]-[86].

En esta tesis se propone el diseño de un controlador MPC basado en la estrategia DMC (Control de Matriz Dinámica) para el control de la presión en un oleoducto.

3.3 Control predictivo basado en modelo (CPBM)

El control MPC es una estrategia que se originó en los últimos años del siglo XX y ha experimentado un avance significativo. El MPC constituye un conjunto de métodos de control que utilizan un modelo explícito de la planta para derivar la señal de control minimizando una función objetivo [14].

3.4 Elementos del control predictivo basado en modelo

Todos los algoritmos MPC comparten elementos comunes. Estos elementos son:

3.4.1 Modelo de predicción

El modelo es fundamental en el control MPC y debe posibilitar capturar la dinámica importante de la planta y permitir obtener predicciones precisas. El MPC utiliza diferentes modelos para relacionar las variables de entradas, salidas y las perturbaciones. Además, se puede considerar un modelo de las perturbaciones no medibles. El modelo de predicción está integrado por dos partes:

el modelo del proceso y el modelo de perturbaciones, ambas esenciales para que el modelo realice predicciones precisas. Algunos modelos utilizados en el diseño de controladores MPC son el de respuesta impulso y el de respuesta escalón [14].

3.4.1.1 Modelo del proceso respuesta impulso

Este modelo, también conocido como modelo de convolución se utiliza en el MAC (Control Algorítmico Basado en Modelo). Se basa en la relación entre la salida y la entrada de la planta utilizando una ecuación que involucra parámetros como h_i , que representan las amplitudes muestreadas de la señal de salida cuando el proceso se excita con un impulso unitario (Figura 3.1). Este método requiere un gran número de parámetros y solo puede representar procesos estables.

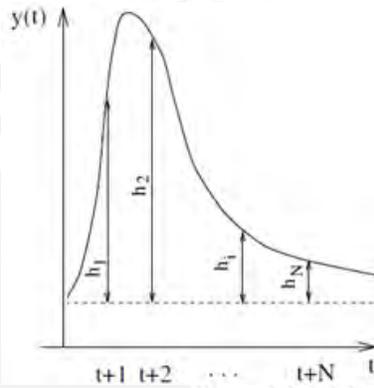


Figura 3.1. Modelo del proceso respuesta impulso.

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) \quad (3.1)$$

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t+k-i|t) = H(z^{-1} u(t+k|t)) \quad (3.2)$$

3.4.1.2 Modelo del proceso respuesta escalón

Este modelo es similar al modelo respuesta impulso, pero utiliza una señal de entrada escalón (Figura 3.2). Se utiliza en el DMC. La respuesta se expresa mediante una ecuación que involucra los valores muestreados g_i de la señal de salida. Este modelo es intuitivo, refleja claramente la influencia de las variables manipuladas en las salidas y se representa como:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \quad (3.3)$$

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) = y_0 + G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t) \quad (3.4)$$

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t+k-i|t) \quad (3.5)$$

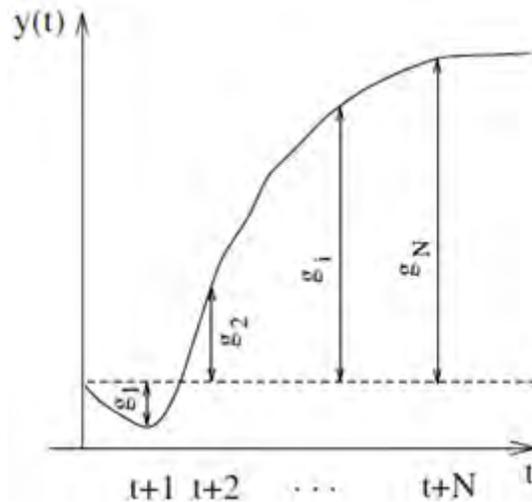


Figura 3.2. Modelo del proceso respuesta escalón.

3.4.2 Modelo de perturbaciones

En el control MPC la elección del modelo de perturbaciones presenta una elevada importancia. Un modelo comúnmente utilizado para representar a las perturbaciones es el modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil (ARIMA) en el que las perturbaciones no medibles se representan mediante la expresión [14]:

$$n(t) = \frac{C(z^{-1})}{D(z^{-1})} \xi(t) \quad (3.6)$$

donde el polinomio $D(z^{-1})$ representa un integrador:

$$\Delta = 1 - z^{-1}$$

$\xi(t)$ es un ruido blanco de media cero, y el polinomio $C(z^{-1})=1$ (3.7)

El modelo de perturbación ARIMA se puede representar mediante la expresión:

$$n(t) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \xi(t) \quad (3.8)$$

3.4.3 Respuesta libre y forzada

En la mayoría de los MPC, se utilizan conceptos de respuesta libre y respuesta forzada (Figura 3.3). Esto implica expresar la secuencia de control como la suma de las siguientes dos señales [14]:

Respuesta libre: representa a la salida de la planta bajo la acción de señales de control pasadas. Las señales de control pasadas en el futuro se mantienen constantes e igual al último valor en el pasado.

Respuesta forzada: representa a la salida de la planta bajo el efecto de las señales de control presente y futuras. La señal de control futura se establece en cero en el pasado y toma sus nuevos valores en el presente y futuro.

La respuesta libre refleja la evolución del proceso debido a las acciones de control pasadas $u_f(t)$ y la respuesta forzada la evolución debido a señales de control presente y futuras $u_c(t)$.

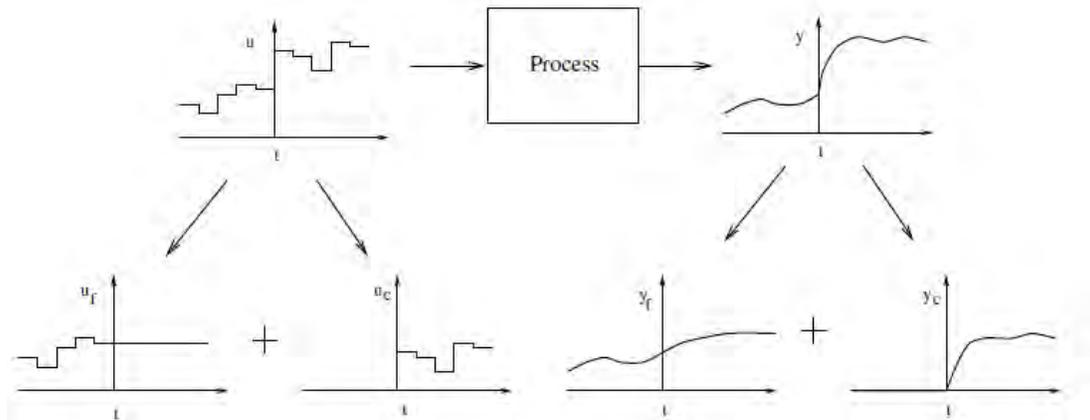


Figura 3.3. Respuesta libre y forzada [14].

$$u(t) = u_f(t) + u_c(t) \quad (3.9)$$

$$u_f(t - j) = u(t - j) \quad (3.10)$$

$$u_f(t + j) = u(t - j) \quad (3.11)$$

$$u_c(t - j) = 0 \quad (3.12)$$

$$u_c(t + j) = u(t + j) \quad (3.13)$$

3.4.4 Función objetivo

Los algoritmos de CPBM buscan que la salida futura siga una señal de referencia interna mientras penalizan el esfuerzo de control. La función de costo general se compone de dos términos: uno que mide la discrepancia entre la salida predicha y la referencia interna y otro que penaliza el esfuerzo de control.

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t + j | t) - w(t + j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u-1} \lambda(j) [\Delta u(t + j - 1)]^2 \quad (3.14)$$

En la función de coste (3.14) se ajustan varios parámetros:

- Los horizontes de predicción mínimo (N_1) y máximo (N_2) definen los límites en lo que la salida debe seguir a la referencia y junto con el horizonte de control (N_u) permiten ajustar la respuesta del sistema de control.

- Los coeficientes de peso $\delta(j)$ y $\lambda(j)$, posibilitan ponderar el comportamiento futuro y constituyen parámetros de ajuste del controlador para lograr un control suave o agresivo.

La trayectoria de referencia interna $w(t+k)$ no necesita coincidir con la referencia externa $r(t+k)$ y permite anticipar cambios en la referencia ajustando su parámetro α para influir en la respuesta del sistema. Una ventaja del MPC es que, si se conoce la evolución futura de la referencia interna, el sistema puede reaccionar antes de que se originen cambios. La mayoría de los métodos MPC utilizan una trayectoria de referencia interna $w(t+k)$ que no necesita coincidir con la referencia externa $r(t+k)$. La referencia interna se puede ajustar suavemente desde el valor actual de la salida $y(t)$ hacia la referencia externa mediante un sistema de primer orden. El coeficiente α (toma valores entre 0 y 1), ajusta la suavidad de la aproximación (Figura 3.4) [14].

$$w(t+k) = \alpha w(t+k-1) + (1-\alpha)r(t+k) \quad k = 1, \dots, N \quad (3.15)$$

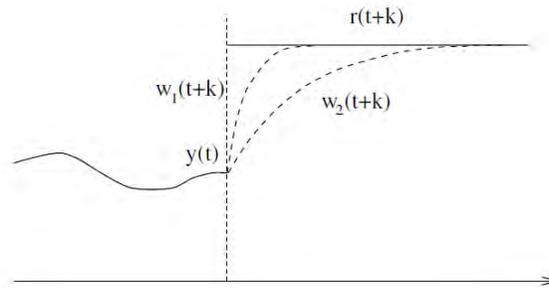


Figura 3.4. Trayectorias de referencia interna.

Restricciones: En la actividad industrial real, los procesos presentan limitaciones debido a factores físicos (actuadores, posiciones de válvulas, etc.), de seguridad, ambientales y económicos [14]. Estas limitaciones deben considerarse en la función de optimización. Algunos algoritmos predictivos ya incorporan estas limitaciones (MAC, DMC), mientras que otros pueden incluirlas después (GPC). Por lo general, se consideran restricciones en la amplitud de la señal de control, la tasa de cambio de esta señal y los límites de la señal de salida.

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \quad \forall t \quad (3.16)$$

$$du_{min} \leq u(t) - u(t-1) \leq du_{max} \quad \forall t \quad (3.17)$$

$$y_{min} \leq y(t) \leq y_{max} \quad \forall t \quad (3.18)$$

3.4.5 Ley de control

Para obtener la ley de control, se minimiza la función de coste J , calculando las predicciones y considerando la estructuración de la ley de control, la cual mejora la robustez, evita problemas de alta frecuencia y utiliza el concepto de horizonte de control que considera que después de un periodo de tiempo $N_u < N_2$ no existen variaciones en la señal de control [14]:

$$\Delta u(t + j - 1) = 0 \quad j > N_u \quad (3.19)$$

Si existen restricciones, se utilizan métodos de programación cuadrática y se aplican ciertas estrategias, como el Control Predictivo de Horizonte Residente con Restricciones (CRHPC) y el Control Predictivo Generalizado (GPC). A pesar de las ventajas, como la flexibilidad en la consideración de restricciones, estos métodos presentan desafíos, como la necesidad de disponer de modelos precisos de la planta y las limitaciones para trabajar con procesos inestables.

3.5 Control de Matriz Dinámica (DMC)

El controlador DMC utiliza el modelo respuesta escalón descrito, el cual considera que se alcanza la estabilidad en los N primeros términos. Por lo que considerando (3.5) y añadiendo los términos de perturbaciones medibles d_i y no medibles \hat{n} , el modelo de predicción a lo largo del horizonte se representa en la forma [14]:

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t - i) + \sum_{i=1}^{\infty} d_i \Delta v(t - i) + \hat{n}(t + k|t) \quad (3.20)$$

La perturbación no medible se considera constante e igual a la medida de la salida menos la estimación del modelo, es decir:

$$\hat{n}(t + k|t) = \hat{n}(t) = y(t) - \hat{y}(t/t) \quad (3.21)$$

Considerando (3.21) la expresión (3.20) queda como:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t + k|t) &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t + k - i) + y(t) \\ &+ \sum_{i=1}^k d_i \Delta v(t + k - i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} d_i \Delta v(t + k - i) - \hat{y}(t/t) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Por consiguiente (3.22) se representa como:

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t + k - i) + f(t + k) \quad (3.23)$$

donde:

$$f(t+k) = y(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) + \sum_{i=1}^{\infty} (d_{k+i} - d_i) \Delta v(t-i) + \sum_{i=1}^k d_i \Delta v(t+k-i) \quad (3.24)$$

Si la planta es estable, para $i > N$ se cumple:

$$g_{k+i} - g_i \approx 0 \quad (3.25)$$

Por consiguiente, la respuesta libre (3.24) se presenta como:

$$f(t+k) = y(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) + \sum_{i=1}^N (d_{k+i} - d_i) \Delta v(t-i) + \sum_{i=1}^k d_i \Delta v(t+k-i) \quad (3.26)$$

Las predicciones son calculadas como:

$$\hat{y}(t+1|t) = g_1 \Delta u(t) + f(t+1) \quad (3.27)$$

$$\hat{y}(t+2|t) = g_1 \Delta u(t) + g_2 \Delta u(t+1) + f(t+2) \quad (3.28)$$

Y así sucesivamente hasta:

$$\hat{y}(t+N_2|t) = \sum_{i=N_2-N_u+1}^{N_2} \Delta u(t) + g_i \Delta u(t+1) + f(t+i) \quad (3.29)$$

Se define la matriz dinámica G:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ g_3 & g_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_u} & g_{N_u-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_2} & g_{N_2-1} & \dots & g_{N_2-N_u+1} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

La matriz G está formado por N_2 filas y N_u columnas de las amplitudes de la respuesta escalón ordenadas adecuadamente hacia abajo. Finalmente, se obtiene:

$$\hat{y} = G \Delta u + f \quad (3.31)$$

La expresión (3.31) constituye el modelo de predicción para el diseño del controlador DMC.

3.5.1 Diseño del controlador DMC de la presión en un oleoducto.

Para el diseño del controlador DMC, se aplica una señal de entrada escalón y la respuesta se usa como modelo del proceso de predicción. Se utilizó el modelo ARMAX (2.20) obtenido en el capítulo II, y se generó la respuesta escalón (Figura 3.5).

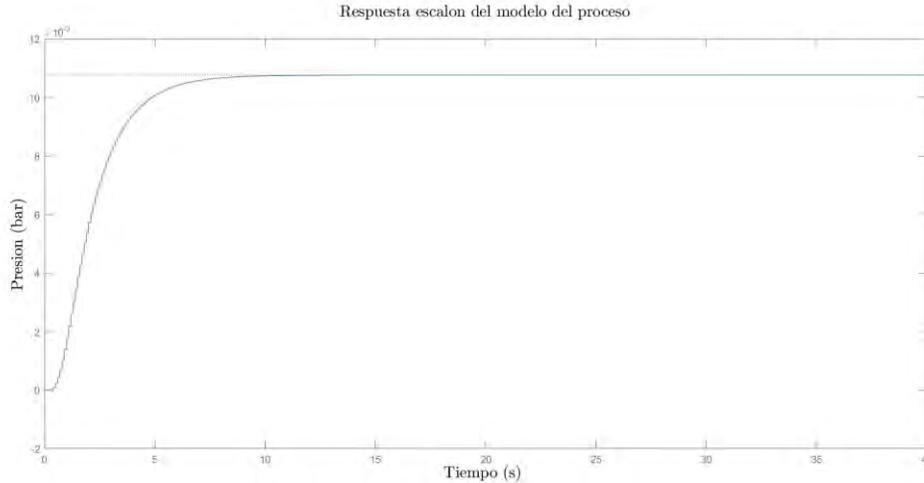


Figura 3.5. Respuesta escalón obtenida en base al modelo ARMAX del oleoducto obtenido en (2.20).

Los coeficientes de la respuesta escalón representada en la Figura 3.5 integran la matriz G cuyo número de filas está definido por el horizonte de predicción (N_2) y el número de columnas por el horizonte de control (N_u). Esta matriz se utiliza en la obtención de la señal de control. La ley de control se obtiene minimizando la función de coste (3.14) y se representa mediante la expresión [14]:

$$\Delta u(t) = (G^T \delta G + \lambda I)^{-1} G^T \delta^T (w - f) \quad (3.32)$$

Los coeficientes de peso δ y λ de (3.32) son también parámetros de ajuste del controlador. Se utilizaron diversos valores de estos coeficientes y se observó que el comportamiento del controlador se comporta de forma robusta o agresiva según el valor de estos coeficientes. La expresión (3.32) se presenta en la forma:

$$\Delta u(t) = M(w - f) \quad (3.33)$$

donde M es una matriz representada como [14]:

$$M = (G^T \delta G + \lambda I)^{-1} G^T \delta^T \quad (3.34)$$

Además, es conocido que solo el primer componente del vector de control de $\Delta u(t)$ en (3.32) es el que se envía a la planta, el resto de los componentes se descartan, por ende, solo se necesita la primera fila de la matriz M , es decir el vector K [14]:

$$\Delta u(t) = K(w - f) = Ke(t) \quad (3.35)$$

donde $e(t)$ es el vector de errores futuros.

De la expresión (3.35) se define que el incremento de la señal de control es proporcional (mediante K) a los errores futuros.

3.5.2 Desarrollo del algoritmo del controlador DMC en Matlab y Simulink

El desarrollo matemático presentado en el epígrafe anterior se utiliza para diseñar el algoritmo del controlador DMC utilizando Matlab y Simulink:

Primero, se desarrolló un archivo denominado Control_DMC_Oleoducto.m (véase anexo 1). Este archivo es el programa principal que se ejecuta en Matlab.

El código del programa principal se divide en varias partes. En la primera parte, se define el modelo identificado en la sección anterior como un objeto 'idpoly' de Matlab. Posteriormente, se establecen los parámetros del controlador DMC, incluyendo el tiempo de muestreo. A continuación, se genera la respuesta del modelo de predicción tipo escalón, cuyos coeficientes se seleccionan de acuerdo al tiempo de muestreo del DMC. Finalmente, se definen los parámetros de simulación, como el tiempo de ejecución del archivo de Simulink llamado Simulacion_Proceso_Oleoducto.slx.

El pseudocódigo (Algoritmo 1) de este diseño se muestra a continuación.

Algoritmo 1: Modelo ARMAX del oleoducto y ajustes del controlador DMC

Inicializar los parámetros del modelo ARMAX:

- 1: Establecer el orden de retardo de entrada (nk)
- 2: Definir los coeficientes del polinomio autorregresivo (A)
- 3: Definir los coeficientes polinomiales de media móvil (B)
- 4: Definir los coeficientes polinomiales de entrada exógena (C)
- 5: Establecer el tiempo de muestreo del modelo ARMAX (T_s)

Ajustar los parámetros del controlador DMC:

- 6: Establezca el tiempo de muestreo DMC (T_{s_DMC})
 - 7: Establecer el horizonte mínimo (N_1)
 - 8: Establecer el horizonte del modelo (N)
-

9: Establecer el horizonte de predicción (N_2)

10: Establecer el horizonte de control (N_u)

11: Establecer el peso (δ) de la función de costos

12: Remodelar (δ) al multiplicarla por una matriz identidad de tamaño N_2

13: Establecer el peso (λ) de la función de costo

Crear el modelo de predicción del tipo de paso:

14: Generar la respuesta al paso (g) del modelo ARMAX con un tamaño de paso de T_s

15: Vuelva a muestrear la respuesta al paso a intervalos de $\frac{T_{sDMC}}{T_s}$

Ejecutar la simulación:

16: Establecer el tiempo de simulación (T_{sim})

17: Ejecute el archivo de Simulink 'Simulacion_Proceso_Oleoducto' con los comandos 'connect' y 'start'

Como se mencionó, el programa anexo al principal llamado “Simulacion_Proceso_Oleoducto.slx” se encuentra en simulink, este incluye el controlador DMC, el modelo del oleoducto, la referencia y los graficadores, y se inicializa con los parámetros definidos en el programa principal.

El diagrama de bloques, que se exhibe en la Figura 3.6, incluye un bloque denominado Controlador_DMC (ver anexo 2).

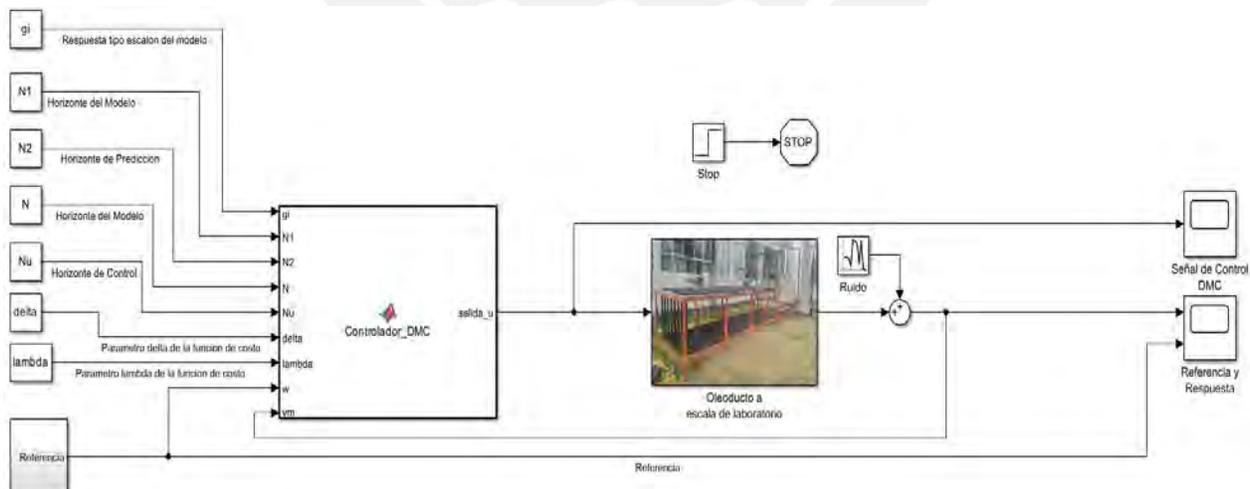


Figura 3.6. Diagrama de bloques del controlador DMC en Simulink.

Este bloque contiene el algoritmo necesario para calcular la señal de control. En la primera ejecución del código, se calculan la matriz G y la matriz M , a partir de las cuales se obtiene la

ganancia de control, según las ecuaciones (3.30) y (3.34). Tras inicializar las condiciones iniciales, el código se dedica a calcular la respuesta libre y, por ende, la ley de control. El seudocódigo (Algoritmo 2) se muestra a continuación:

Algoritmo 2: Algoritmo del controlador DMC

Requiere: $g_i, N, N_1, N_2, N_u, \delta, \lambda, w, y_m$

Definir variables persistentes: $\Delta u, K, u, u_{min}, u_{max}$

1: **Si** u está vacía **entonces**

2: Inicializar u

3: Inicializar los límites de la señal de control u_{min} y u_{max}

Calcular la Matriz G :

4: Inicializar G como una matriz de ceros de tamaño (N_2, N_u)

5: Calcular la Matriz G con elementos de g usando la ecuación (3.30)

6: Calcular M usando la ecuación (3.34)

7: Extrae la primera fila de M para obtener K

8: Inicializar Δu como un vector de ceros de longitud $(1, N)$

9: Establecer como salida a u

Calcular la Respuesta Libre:

10: **No**

11: Inicializar f como un vector cero de longitud N_2

12: Inicializa Δg como un vector de ceros de longitud N

13: **Para** cada elemento en f

14: Calcular Δg correspondiente y actualizar f usando la ecuación (3.26)

15: **Fin Para**

Calcular la ley de control:

16: Calcular u reemplazando K, w y f' en la ecuación (3.35)

17: **Si** u es mayor que el límite superior u_{max} , **entonces**

18: Asignar u al límite superior u_{max}

19: **Sino si** u es menor que el límite inferior u_{min} , **entonces**

20: Asignar u al límite inferior u_{min}

21: **Fin Si**

-
- 22: *Actualice Δu desplazando sus elementos hacia la derecha e insertando u al principio*
- 23: *Establecer como salida a u*
- 24: **Fin Si**
- 25: **Retornar salida**
-

Es posible asignar el tiempo de muestreo al bloque Controlador_DMC, al hacer clic derecho en este, seleccionar la opción Block Parameters (Subsystem) y configurarlo tal como se muestra en la Figura 3.7.

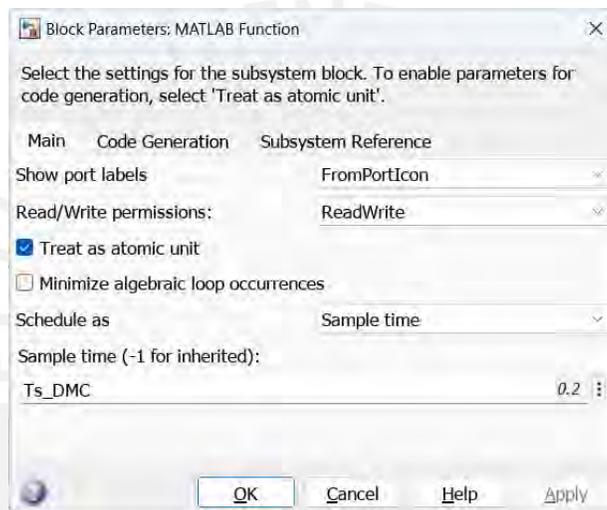


Figura 3.7. Asignación del periodo de muestreo al controlador DMC.

El bloque Oleoducto a escala de laboratorio representa al modelo encontrado en el capítulo II (Figura 3.8). Simplemente este bloque está formado por el objeto idpoly del modelo generado por el código principal, el cual se asignó a un bloque LTI y a la entrada de este bloque se le resta la ganancia de la potencia encontrada en la identificación.

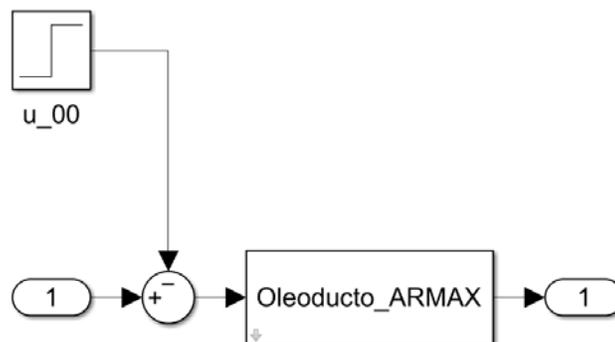


Figura 3.8. Diagrama del bloque del oleoducto a escala de laboratorio.

El tiempo de simulación se declaró en el programa Control_DMC_Oleoducto.m, el cual también se asignó en el bloque Step de Simulink, y como se muestra en la Figura 3.9 este acciona el bloque Stop que finaliza la simulación.

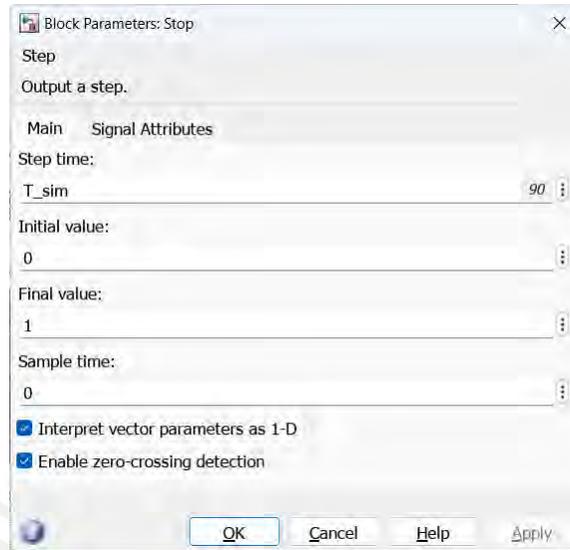


Figura 3.9. Configuración del bloque de Simulink encargado del tiempo de simulación.

3.6 Evaluación del desempeño del controlador DMC

Como primera aproximación se basó en la figura 3.5, donde se obtuvo un horizonte del modelo (N) de 35, a partir del cual el proceso se hace estable o los cambios son insignificantes. Además, se seleccionó el horizonte mínimo (N_1) de predicción igual al retardo del modelo de la planta. En este caso, se eligió $N_1 = 1$.

3.6.1 Evaluación del controlador DMC al variar los parámetros de peso δ y λ

Primer experimento

En el primer experimento se realizaron 4 pruebas fijando δ y variando λ , con valores de inicialización fijos del horizonte de predicción $N_2 = 40$ y del horizonte de control $N_u = 3$. En la Tabla 3.1 se detallan las pruebas realizadas, se muestran los valores de δ y λ . Las respuestas del sistema de control que se obtienen en cada prueba se muestran en las Figuras 3.10 a 3.13.

Tabla 3.1. Pruebas realizadas para distintos valores de λ y δ del controlador DMC

N° Prueba	Parámetros del DMC				
	δ				λ
1	0.1	0.01	0.001	0.0001	2.1
2	0.1	0.01	0.001	0.0001	1.2
3	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.7
4	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.4

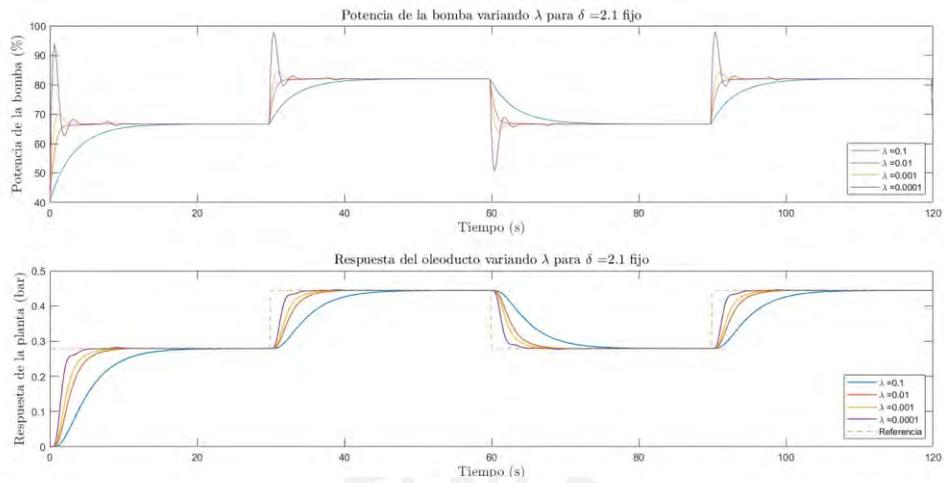


Figura 3.10. Primera prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.

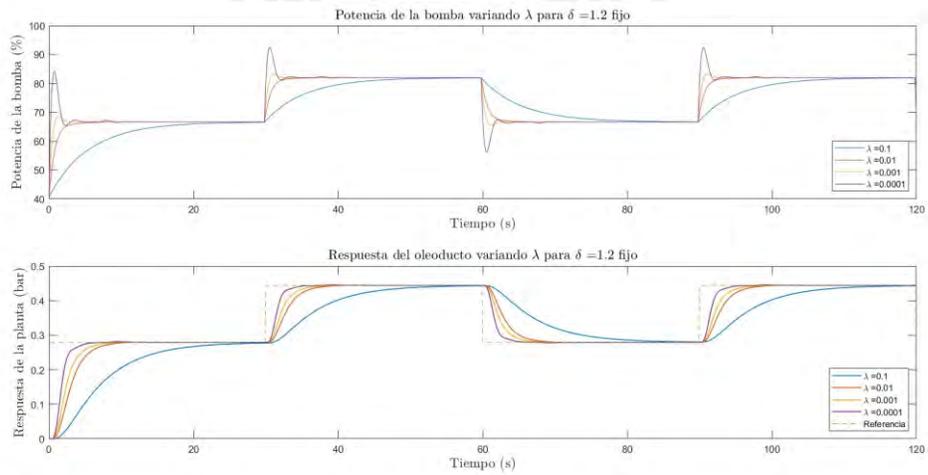


Figura 3.11. Segunda prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.

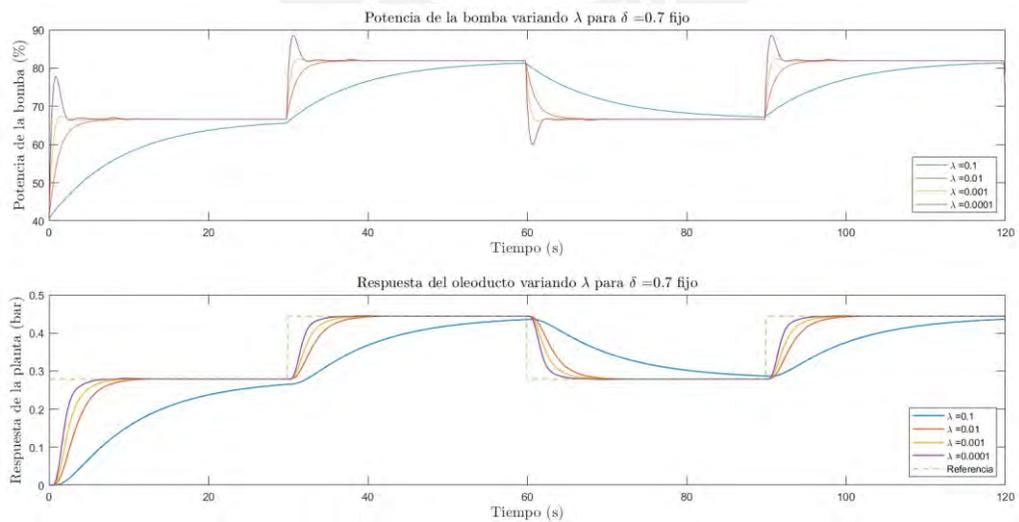


Figura 3.12. Tercera prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.

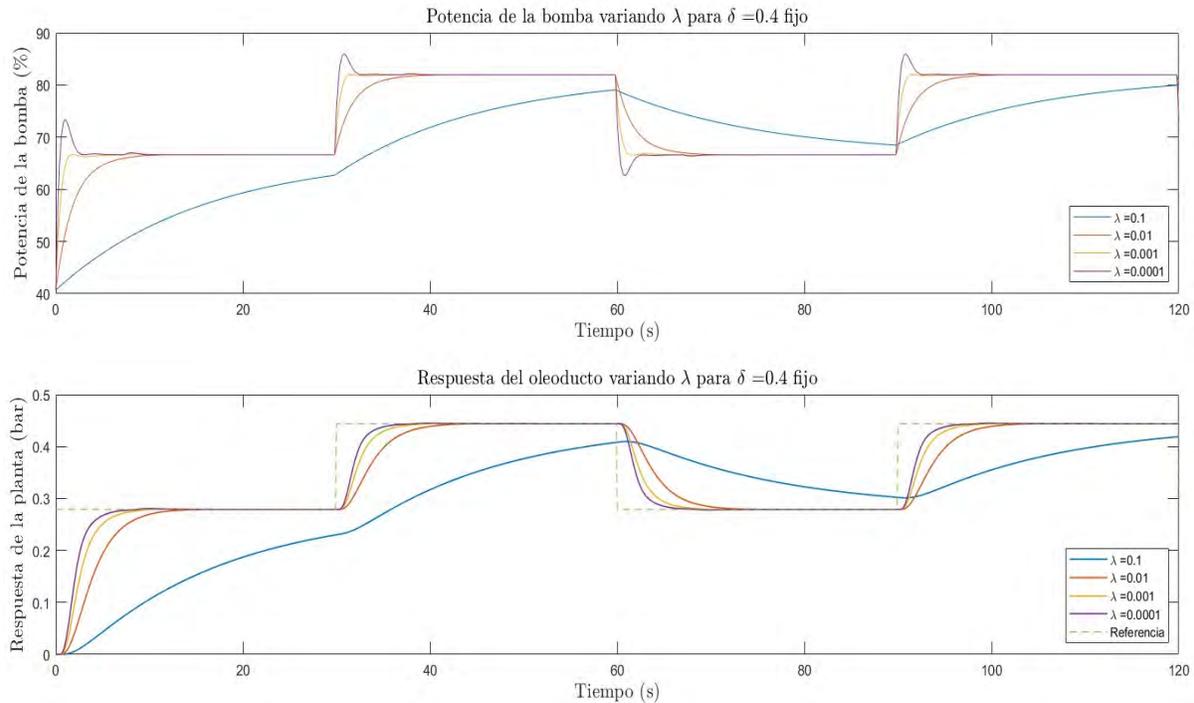


Figura 3.13. Cuarta prueba realizada variando los parámetros del controlador DMC.

Interpretación del primer experimento

De las Figuras 3.10 a 3.13 se observa que un aumento de λ manteniendo δ constante conduce a un control más suave que el que se obtiene con un aumento de δ manteniendo λ constante. Esta afirmación se basa en los resultados obtenidos, por ejemplo, de la Figura 3.10 se observa que debido al aumento de λ desde 0.0001 hasta 0.1 la señal de control es menos agresiva, sin embargo, de las Figuras 3.11 y 3.12 se observa que como la señal de control es menos agresiva la respuesta del sistema de control es más lenta y en el peor caso (Figura 3.13) no alcanza la referencia.

Evaluación de las respuestas obtenidas en el primer experimento

Para encontrar los parámetros del DMC que ofrecen las mejores respuestas, se utilizaron los índices de desempeño. En la Tabla 3.2 se exhiben los índices de desempeño calculados para los diferentes valores de los parámetros considerados en el primer experimento (λ y δ).

Tabla 3.2. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC para distintos valores de λ y δ

Prueba	Parámetros del DMC		Índices de Desempeño			
	δ	λ	ISE	ITSE	IAE	ITAE
1	2.1	0.1	0.598	19.334	4.35	182.085
		0.01	0.334	10.215	2.296	90.538
		0.001	0.276	8.278	1.881	73.182
		0.0001	0.195	5.657	1.26	47.627
2	1.2	0.1	0.786	26.223	6.026	263.846
		0.01	0.361	11.125	2.477	98.203
		0.001	0.289	8.728	1.988	77.641
		0.0001	0.216	6.312	1.406	53.564
3	0.7	0.1	1.083	36.984	8.523	389.403
		0.01	0.402	12.507	2.765	110.495
		0.001	0.301	9.114	2.074	81.244
		0.0001	0.236	6.98	1.564	60.047
4	0.4	0.1	1.587	53.697	11.749	542.468
		0.01	0.469	14.803	3.273	132.696
		0.001	0.314	9.543	2.163	84.966
		0.0001	0.256	7.638	1.725	66.675

De la Tabla 3.2 se observa que, en correspondencia con los índices de desempeño obtenidos, el mejor desempeño del sistema de control se logra con el DMC ajustado con $\lambda = 0.0001$ y $\delta = 2.1$, pero considerando que λ tiene un valor muy pequeño, lo que implica un control muy agresivo, se decidió disminuir δ ($\delta = 0.7$).

3.6.2 Evaluación del controlador DMC variando el horizonte de control (N_u) y el horizonte de predicción (N_2)

El segundo experimento también contó con 4 pruebas variando el horizonte de control (N_u) y el horizonte de predicción (N_2), se consideran los valores de $\delta=0.7$ y $\lambda =0.0001$ como valores fijos. En la Tabla 3.3 se exhiben las pruebas realizadas para diferentes valores de N_u y N_2 . Las respuestas del sistema de control de presión con el DMC para cada prueba se presentan en las Figuras 3.14 - 3.17.

Tabla 3.3. Pruebas realizadas para distintos valores de N_u y N_2 del controlador DMC

N° Prueba	Parámetros del DMC				
	N_2				N_u
5	35	45	55	65	2
6	35	45	55	65	3
7	35	45	55	65	5
8	35	45	55	65	10

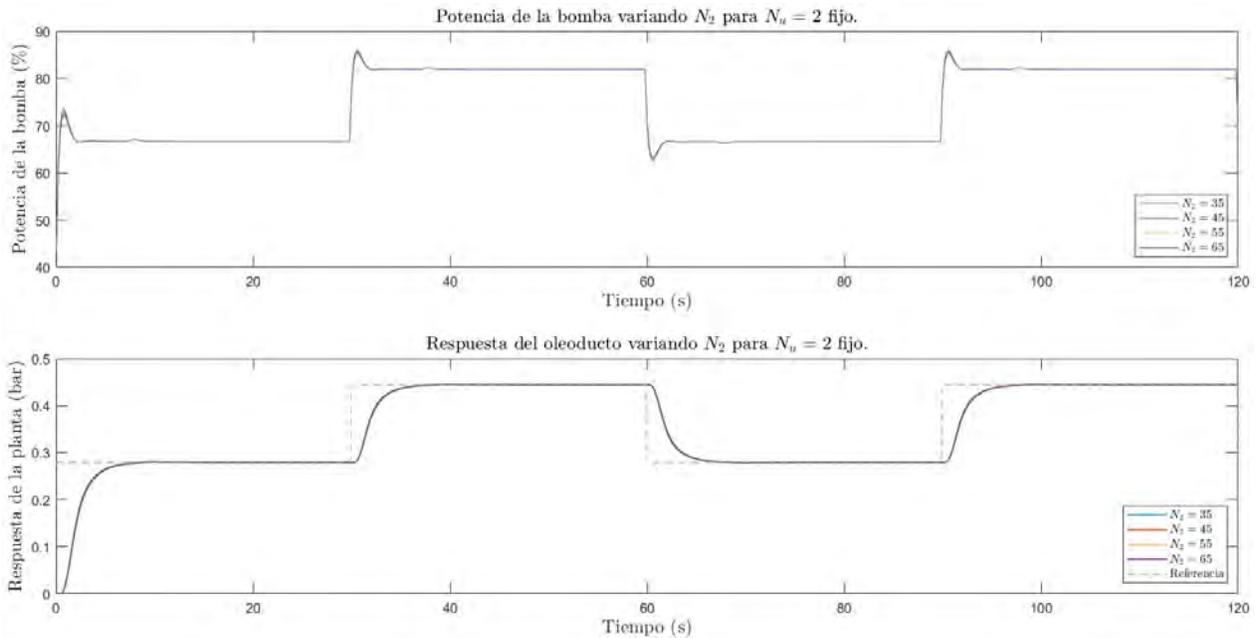


Figura 3.14. Quinta prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

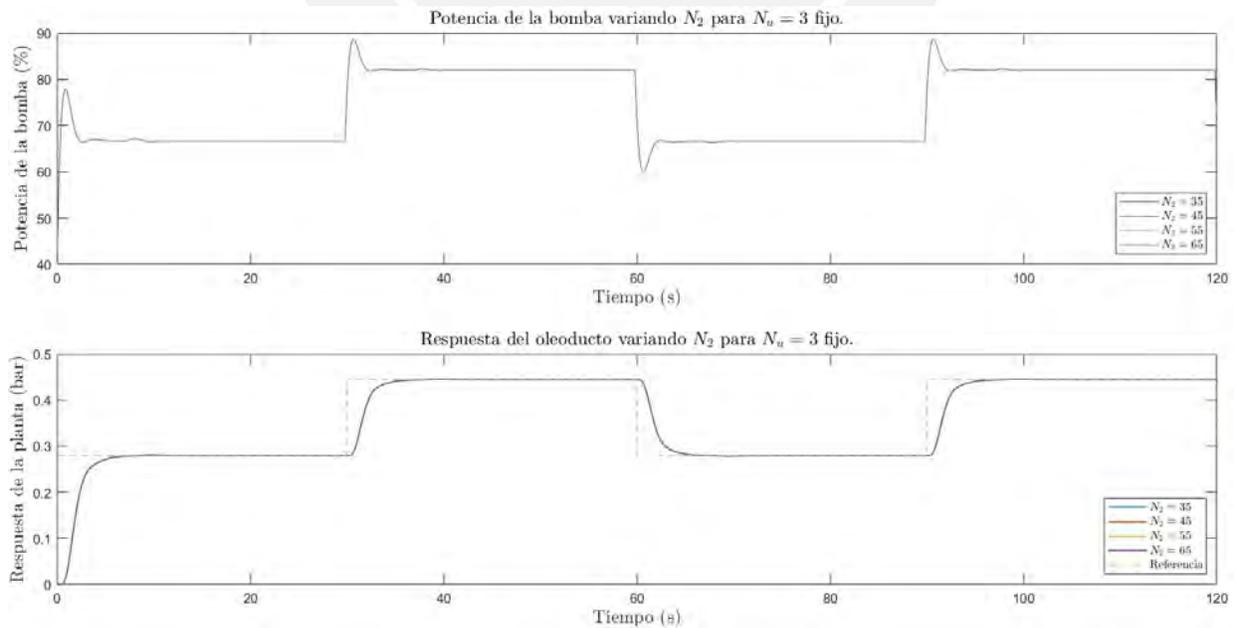


Figura 3.15. Sexta prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

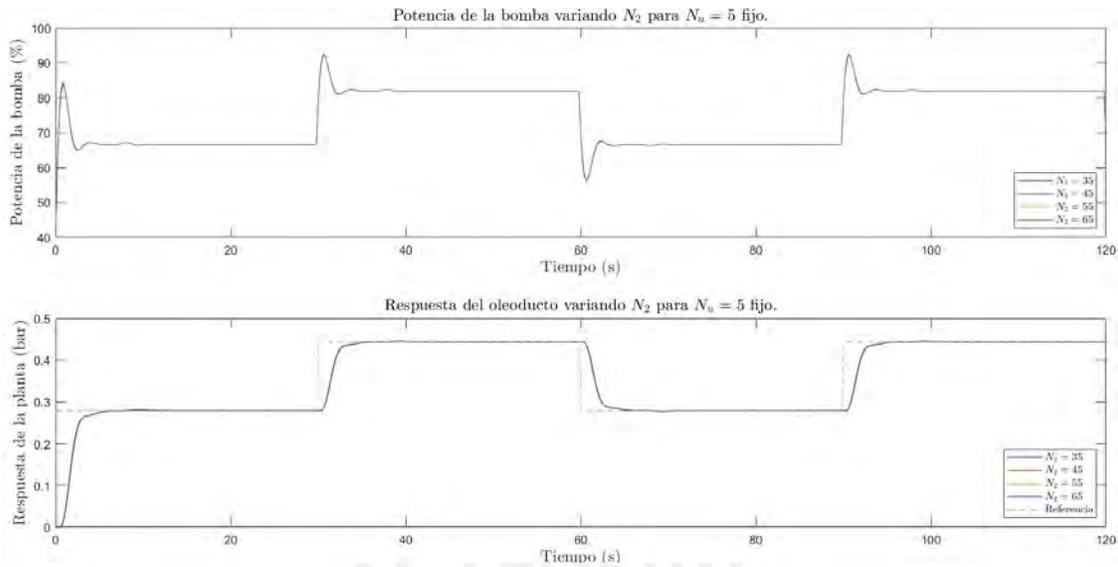


Figura 3.16. Séptima prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

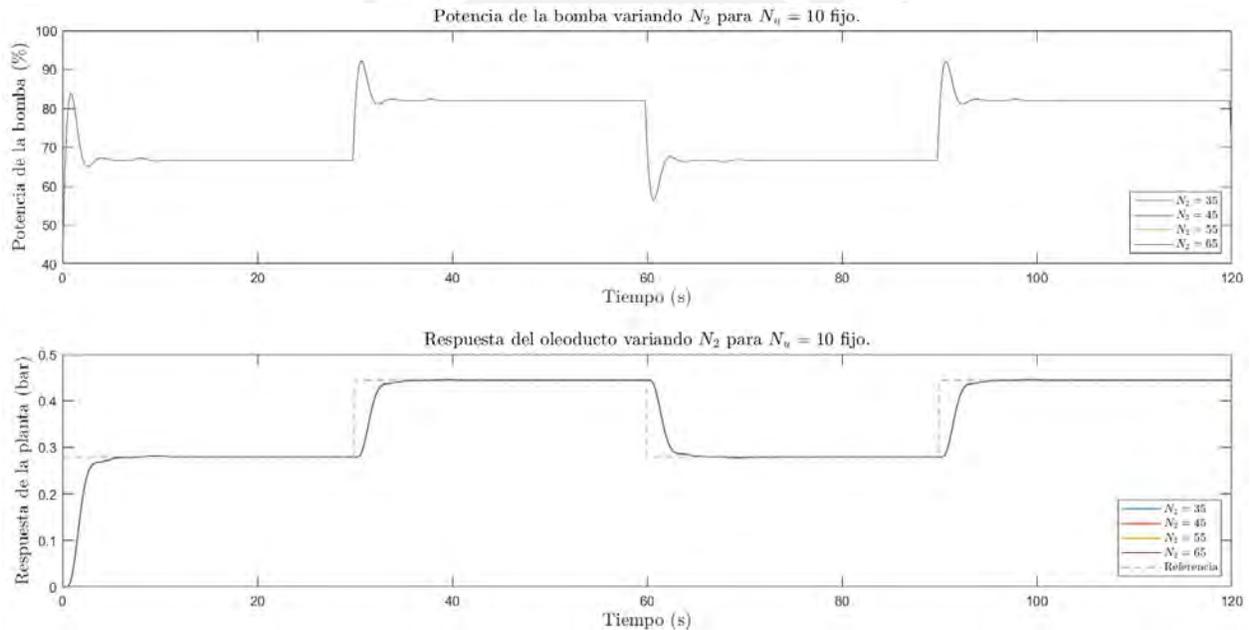


Figura 3.17. Octava prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

Interpretación del segundo experimento

De la Figura 3.14 se observa una ligera variación de la señal de control y la respuesta del sistema de control de presión al variar el horizonte de predicción N_2 con un horizonte de control $N_u=2$. Es conocido que al aumentar el horizonte de predicción se mejora la capacidad del controlador para anticipar eventos futuros a costa de un mayor esfuerzo computacional. Igualmente, se conoce que si el horizonte de control es demasiado grande la carga computacional es mayor. De las Figuras 3.15, 3.16 y 3.17 es posible observar las respuestas del sistema de control al aumentar N_u y variando N_2 .

Evaluación de las respuestas obtenidas en el segundo experimento

Para encontrar los parámetros del DMC que ofrecen las mejores respuestas, se utilizaron los índices de desempeño. En la Tabla 3.4 se ofrecen los valores de los índices de desempeño obtenidos para los diferentes valores de los parámetros considerados en el segundo experimento (N_u y N_2).

Tabla 3.4. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC para distintos valores de N_u y N_2

Prueba	Parámetros del DMC		Índices de Desempeño			
	N_u	N_2	ISE	ITSE	IAE	ITAE
5	2	35	0.249	7.402	1.722	66.662
		45	0.252	7.491	1.746	67.63
		55	0.253	7.539	1.758	68.144
		65	0.254	7.568	1.766	68.457
6	3	35	0.236	6.979	1.564	60.037
		45	0.236	6.979	1.564	60.038
		55	0.236	6.977	1.564	60.01
		65	0.236	6.974	1.563	59.987
7	5	35	0.221	6.476	1.406	53.492
		45	0.22	6.438	1.398	53.192
		55	0.219	6.418	1.394	53.033
		65	0.219	6.406	1.392	52.939
8	10	35	0.22	6.459	1.397	53.127
		45	0.22	6.459	1.398	53.169
		55	0.22	6.46	1.398	53.192
		65	0.22	6.46	1.399	53.205

De la Tabla 3.4, se observa que los mejores índices de desempeño se obtienen con el horizonte de control N_u igual a 3, 5 y 10. Cuando varía el horizonte de predicción N_2 el índice de desempeño no cambia notablemente. Como mejor valor del horizonte de control se eligió $N_u = 3$.

3.6.3 Evaluación del controlador DMC al variar el horizonte mínimo N_1 y el horizonte máximo N_2 de predicción

En todos los experimentos anteriores se utilizó un horizonte mínimo de predicción (N_1) igual a 1 basado en que usualmente se asigna su valor igual al retardo, pero con el interés de mejorar la respuesta de la planta, se realizó un cuarto experimento cuyas pruebas detalladas y configuración realizadas, incluyendo los valores de N_1 y N_2 se muestran en la Tabla 3.5, además las respuestas

del sistema de control que se obtuvieron para cada prueba se exhiben en las Figuras 3.18 - 3.21.

Tabla 3.5. Pruebas realizadas para diferentes valores de N_1 y N_2 del controlador DMC

N° Prueba	Parámetros del DMC					
	N_2					N_1
13	35	40	45	55	65	2
14	35	40	45	55	65	4
15	35	40	45	55	65	5
16	35	40	45	55	65	10

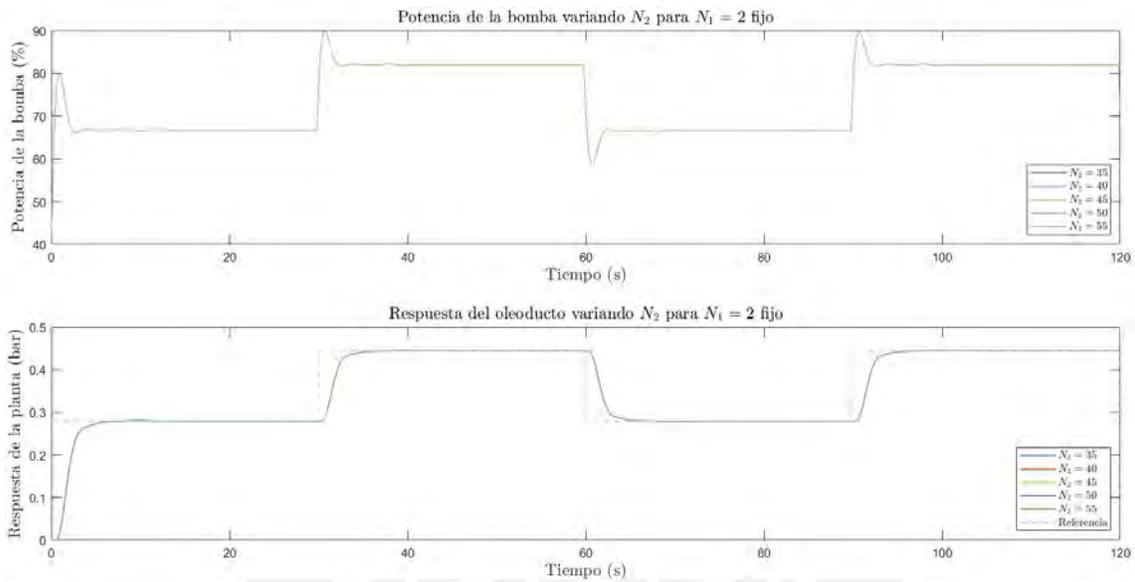


Figura 3.18. Novena prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

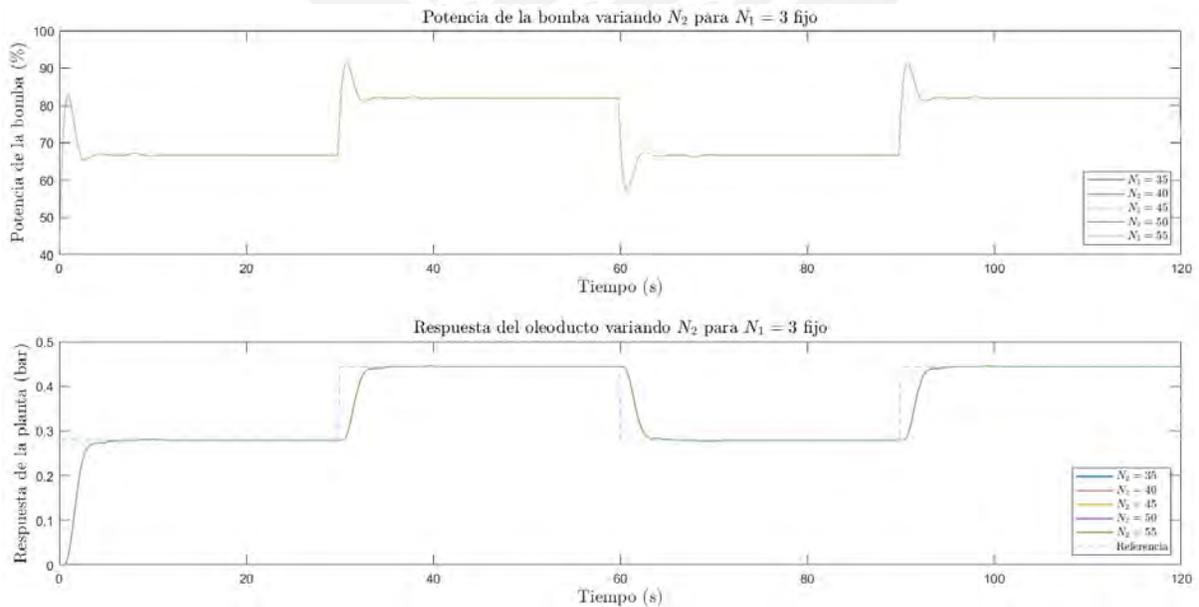


Figura 3.19. Décima prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

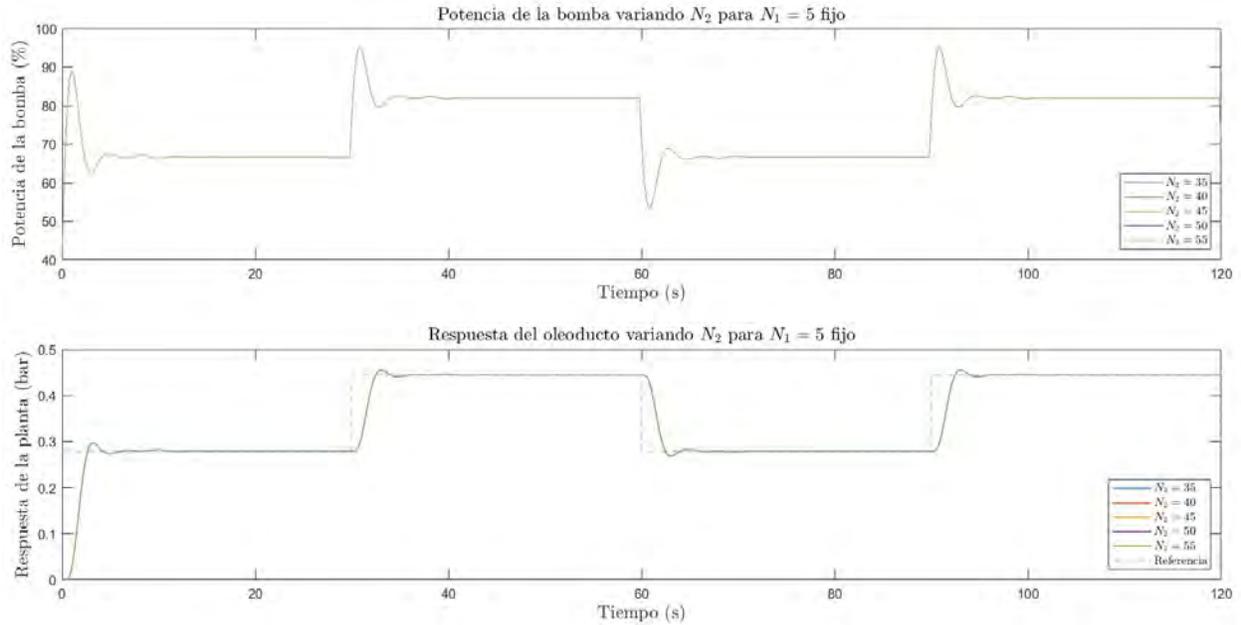


Figura 3.20. Onceava prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

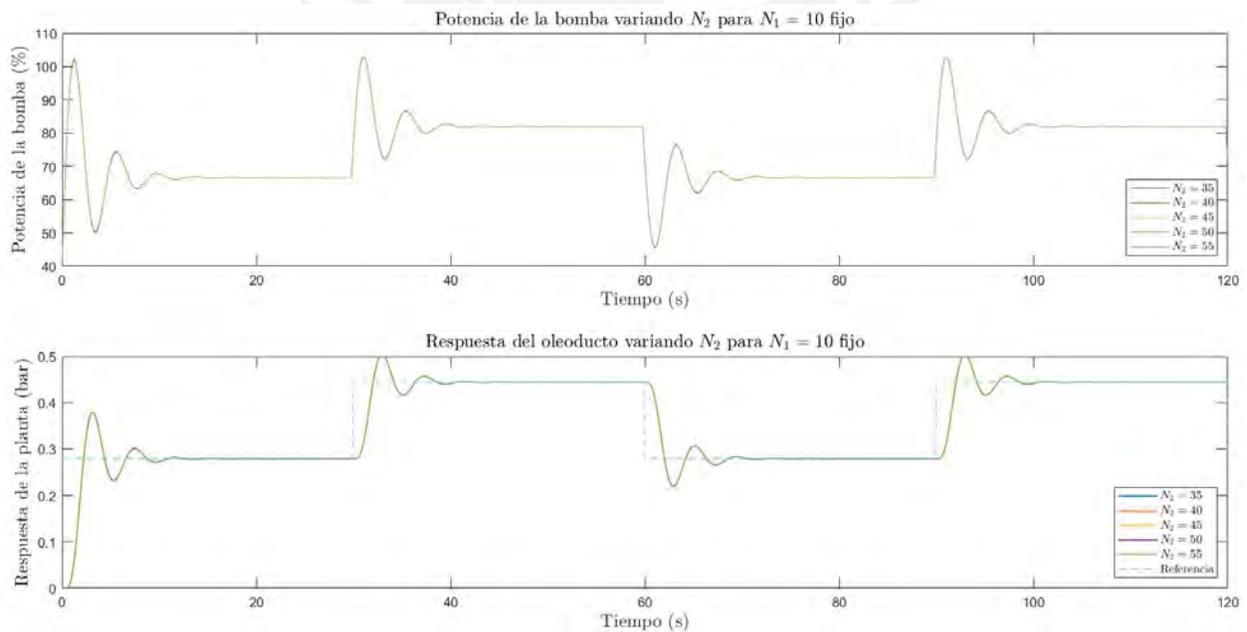


Figura 3.21. Doceava prueba realizada al variar los parámetros del controlador DMC.

Interpretación del tercer experimento

De las Figura 3.18 a 3.21 es posible observar que al aumentar el horizonte N_1 , la señal de control se vuelve más agresiva y la respuesta más rápida tanto así que genera un sobre impulso en la misma, pero este rendimiento tiene un límite, tal como se muestra en la Figura 3.21, en la cual, con un horizonte $N_1 = 10$, para todos los valores de N_2 , las respuestas tienden a volverse inestables.

Evaluación de las respuestas obtenidas en el tercer experimento

Para encontrar los parámetros que ofrecen la mejor respuesta, se recurrió a evaluaciones mediante índices de desempeño. En la Tabla 3.6 se exhiben todos los índices de desempeño calculados para cada combinación de los parámetros considerados en el tercer experimento (N_1 y N_2). Se observa que todos los índices de desempeño mejoran al aumentar el horizonte mínimo hasta un valor máximo de $N_1 = 5$, ya que para un horizonte mínimo de $N_1 = 10$ el desempeño se reduce. Por consiguiente, en base a los índices de desempeño y al costo computacional es correcto elegir un horizonte mínimo N_1 igual a 2, 4 o 5 y un horizonte máximo de predicción de $N_2 = 35$ o más.

Tabla 3.6. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC para distintos valores de N_1 y N_2

Prueba	Parámetros del DMC		Índices de Desempeño			
	N_1	N_2	ISE	ITSE	IAE	ITAE
13	2	35	0.23	6.793	1.491	56.99
		40	0.231	6.793	1.491	56.995
		45	0.23	6.792	1.491	56.982
		55	0.23	6.791	1.49	56.966
		65	0.23	6.789	1.49	56.951
14	4	35	0.22	6.447	1.329	50.317
		40	0.22	6.447	1.329	50.314
		45	0.22	6.445	1.329	50.303
		55	0.22	6.444	1.329	50.291
		65	0.22	6.442	1.329	50.28
15	5	35	0.217	6.336	1.335	50.621
		40	0.217	6.336	1.335	50.62
		45	0.216	6.334	1.335	50.617
		55	0.216	6.333	1.335	50.615
		65	0.216	6.332	1.335	50.613
16	10	35	0.237	7.045	1.86	73.494
		40	0.236	7.035	1.853	73.217
		45	0.236	7.028	1.85	73.049
		55	0.236	7.024	1.847	72.937
		65	0.236	7.021	1.845	72.857

Elección de los mejores parámetros del DMC.

La elección de los mejores parámetros de ajuste del DMC se realizó teniendo en cuenta los experimentos desarrollados. Finalmente se determinó que los siguientes parámetros del controlador

DMC:

$N_1 = 4$, $N_2 = 35$, $N_u = 2$, $\delta = 2.2$ y $\lambda = 0.0001$ son los que posibilitan alcanzar la mejor respuesta del sistema de control de presión, considerando los mejores índices de desempeño obtenidos, que se exhiben en la Figura 3.22 y en la Tabla 3.7.

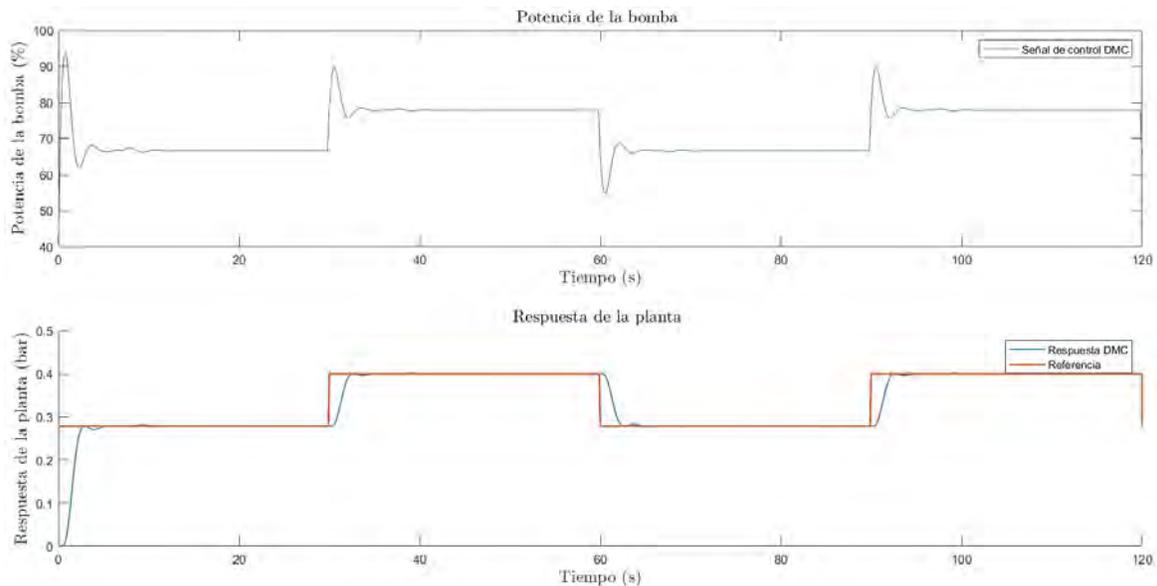


Figura 3.22. Respuesta del sistema de control de presión con el controlador DMC ajustado en base a los parámetros seleccionados.

Tabla 3.7. Mejores índices de desempeño del sistema de control de presión con controlador DMC.

Índice de Desempeño	Controlador DMC
ISE	0.196
ITSE	5.691
IAE	1.192
ITAE	44.8

Otras características de esta respuesta son: $t_s=4.47$ s, $t_r=1.28$ s y $M_p = 1\%$.

3.6.4 Evaluación del sistema de control considerando una perturbación en la salida del sistema

Se evaluó la efectividad del controlador DMC mediante índices de desempeño (Tabla 3.8) considerando una perturbación en la salida del sistema. Se realizaron únicamente dos ensayos que simulan una caída de presión de 0.1 y 0.2 bar en la salida del sistema. Las respuestas del sistema de control de presión con controlador DMC y las señales de control correspondientes se muestran en las Figuras 3.23 y 3.24.

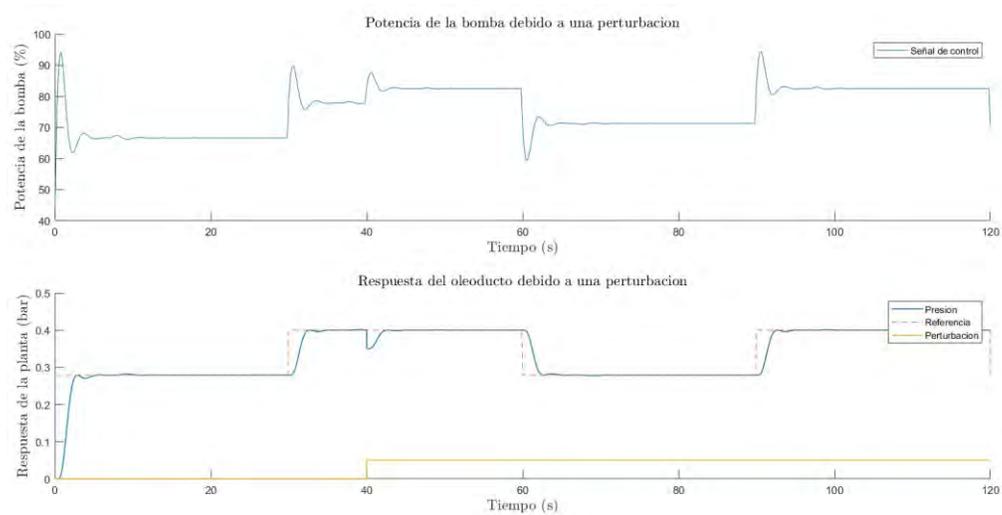


Figura 3.23. Respuesta del sistema de control de presión con controlador DMC considerando una caída de presión en la salida del sistema de 0.05 bar.

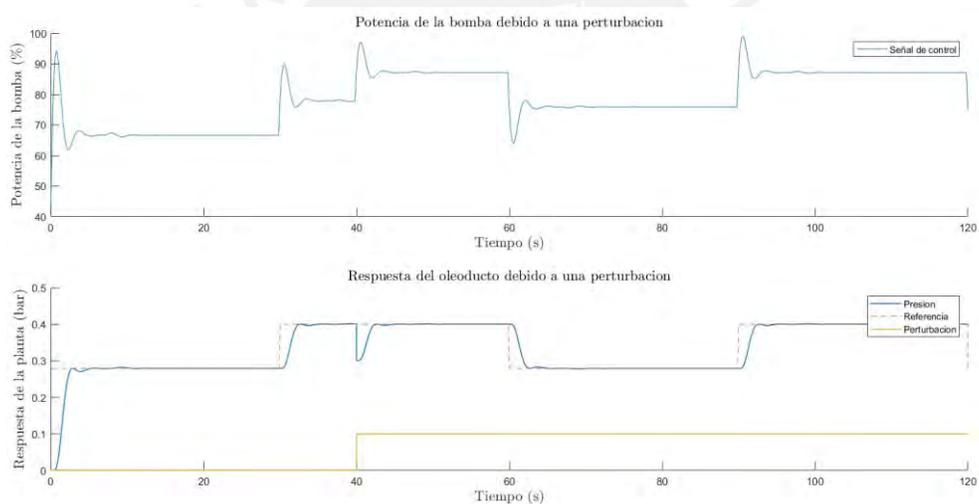


Figura 3.24. Respuesta del sistema de control de presión con controlador DMC considerando una caída de presión en la salida del sistema de 0.1 bar.

Tabla 3.8. Índices de desempeño del sistema de control de presión controlador DMC considerando una perturbación

Índice de Desempeño	Controlador	Controlador
	DMC caída de presión de 0.05 bar	DMC caída de presión de 0.1 bar
ISE	0.156	0.165
ITSE	3.21	3.556
IAE	1.071	1.144
ITAE	35.98	38.98

3.6.5 Evaluación del sistema de control considerando un ruido en el sistema

Se evaluó el sistema de control de presión con controlador DMC mediante índices de desempeño (Tabla 3.9) considerando un ruido de media 0 y varianza 0.00001. Las respuestas del sistema de control de presión y la señal de control correspondiente se ilustran en la Figura 3.25.

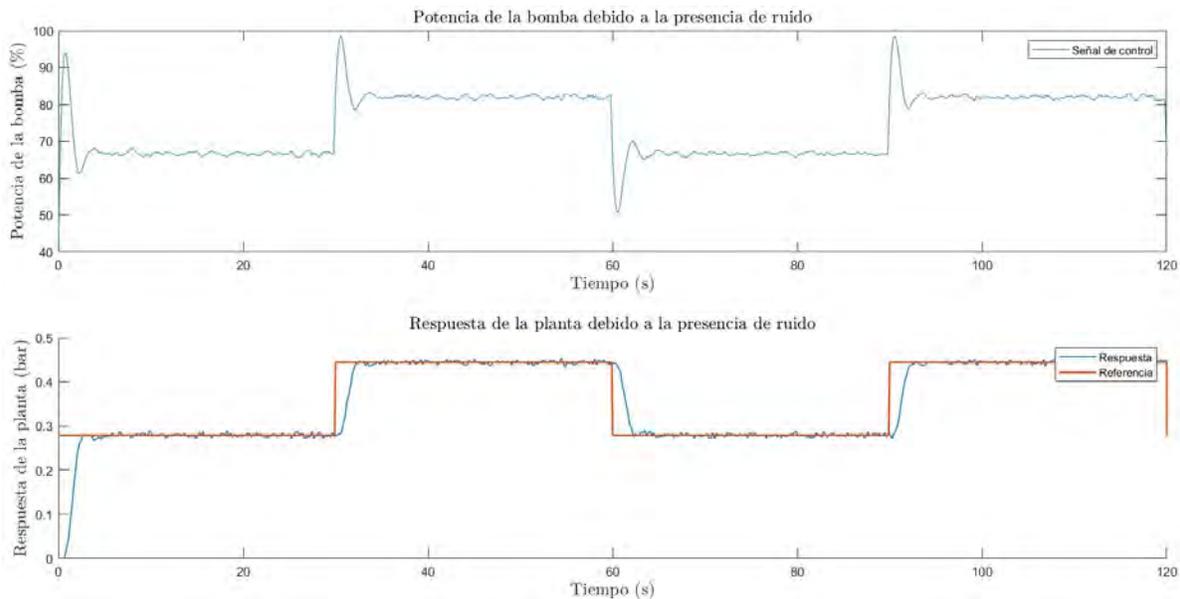


Figura 3.25. Respuesta del sistema de control de presión con controlador DMC considerando un ruido.

Tabla 3.9. Índices de desempeño del sistema de control con controlador DMC considerando un ruido

Índice de Desempeño	Controlador DMC con ruido
ISE	0.2
ITSE	5.827
IAE	1.464
ITAE	61.84

A diferencia de la respuesta sin ruido, se consideró una banda de 5% en vez de 2% para el tiempo de establecimiento, y las características encontradas son: $t_s=2.41$ s, $t_r=1.24$ s y $M_p = 3.9$ %.

3.7 Conclusiones

Se fundamentó y se realizó el diseño de un controlador DMC para el control de la presión en la planta piloto para el transporte de fluidos de la PUCP.

Se realizaron pruebas basadas en simulación utilizando Matlab y Simulink del sistema de control de la presión con el controlador DMC diseñado considerando diferentes valores de sus parámetros

de ajuste: coeficientes de pesos de la función de costo (δ y λ), horizonte de control (N_u), horizonte mínimo (N_1) y horizonte máximo (N_2) de predicción, lo que resultó en una variedad de resultados. Estas pruebas produjeron respuestas del sistema de control de la presión que varían desde lentas hasta rápidas, así como señales de control que van desde suaves hasta agresivas.

Todas las pruebas se evaluaron mediante índices de desempeño, y como resultado se obtuvo que el mejor desempeño del sistema de control de presión se logró con los siguientes parámetros del $N_1 = 4$, $N_2 = 35$, $N_u = 2$, $\delta = 2.2$ y $\lambda = 0.0001$ del controlador DMC diseñado.

Adicionalmente, se evaluó la robustez del controlador DMC frente a cambios escalonados en la señal de referencia externa, perturbaciones y ruido. Los resultados obtenidos muestran que el DMC diseñado permite un control con un elevado desempeño de la presión en la planta objeto de estudio.



CAPÍTULO IV. Propuesta de implementación del sistema de control diseñado

4.1 Introducción

El controlador DMC diseñado ha demostrado ser eficaz. Este capítulo profundiza en su solidez y capacidad para manejar perturbaciones. Se comparan las respuestas temporales del sistema de control usando tanto el controlador DMC como controladores PI. Además, se presenta una propuesta para implementar el controlador DMC en un entorno práctico.

4.2 Análisis comparativo de las respuestas temporales del sistema de control con controladores DMC vs PI

4.2.1 Diseño de un controlador PI de presión en la planta objeto de estudio

El PI (proporcional-integral) en tiempo discreto se representa mediante la siguiente expresión:

$$u(k) = K_c \left(1 + \frac{T_s}{T_i} \right) e(k) - K_c e(k - 1) + u(k - 1) \quad (4.1)$$

La expresión (4.1) se implementó en una función de Matlab llamada Controlador_PI (ver Anexo 3), la cual se incluyó en el archivo de Simulink Simulacion_Proceso_Oleoducto.slx. La implementación de esta función en el diagrama de bloques del sistema de control de presión en Simulink se exhibe en la Figura 4.1.

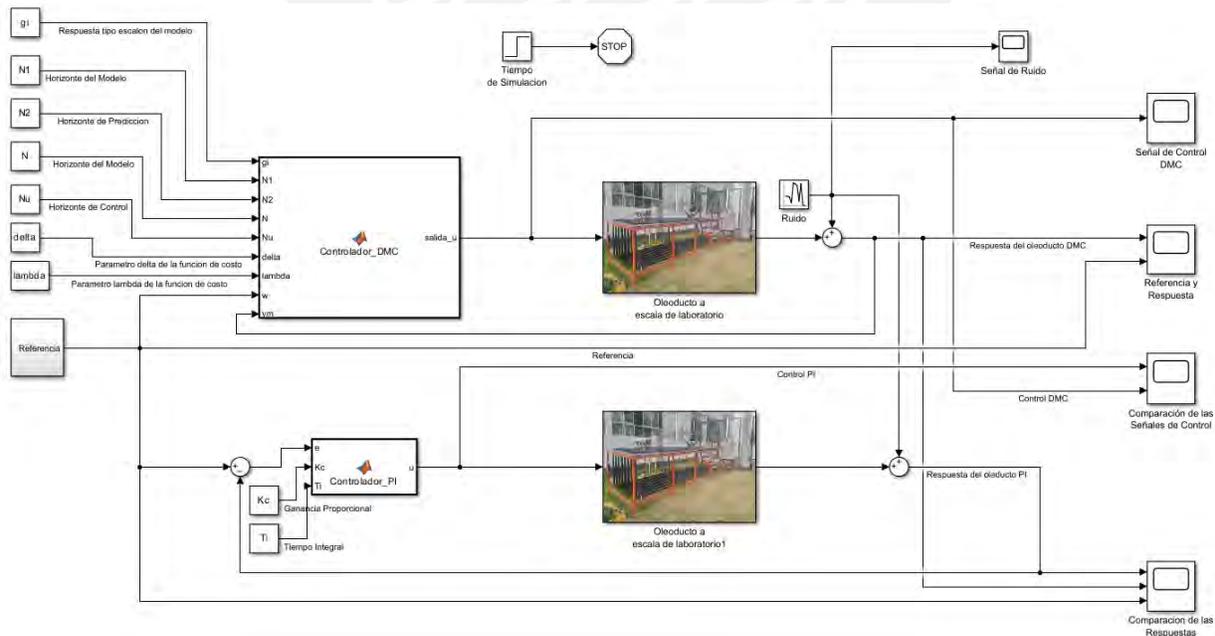


Figura 4.1. Diagrama de bloques del sistema de control de presión en Simulink con controladores DMC y PI.

A continuación, se presenta el pseudocódigo del controlador PI discreto (Algoritmo 3):

Algoritmo 3: Algoritmo del controlador PI

Requiere: K_c , T_i , e_k

Definir variables persistentes: e_{k-1} , u , u_{min} , u_{max}

- 1: **Si** u está vacía **entonces**
 - 2: Inicializar el Tiempo de muestreo (T_s)
 - 3: Inicializar el valor inicial de señal de control (u)
 - 4: Inicializar los límites de la señal de control u_{min} y u_{max}
 - 5: Inicializar el valor inicial del error anterior (e_{k-1})
 - 6: Establecer como salida a u
 - 7: **No**
 - 8: Calcular u reemplazando K_c , T_i , y T_s en la ecuación (4.1)
 - 9: Actualizar e_{k-1} con e_k
 - 10: **Si** u es mayor que el límite superior u_{max} , **entonces**
 - 11: Asignar u al límite superior u_{max}
 - 12: **Sino si** u es menor que el límite inferior u_{min} , **entonces**
 - 13: Asignar u al límite inferior u_{min}
 - 14: **Fin Si**
 - 15: Establecer como salida a u
 16. **Fin Si**
 17. **Retornar salida**
-

4.2.2 Evaluación de la respuesta del sistema de control de presión con controlador PI

En este experimento se realizaron 4 pruebas fijando los valores de la constante proporcional K_c y variando el tiempo integral (T_i). En la Tabla 4.1 se muestran las pruebas realizadas considerando diferentes valores de K_c y T_i , por otra parte, las respuestas que se obtuvieron para cada prueba se exhiben en las Figuras 4.2 - 4.5.

Tabla 4.1. Pruebas realizadas considerando diferentes valores de los parámetros del PI

N° Prueba	Parámetros del PI					K_c
	T_i					
1	1.25	1.43	1.67	2	2.5	65
2	1.25	1.43	1.67	2	2.5	75
3	1.25	1.43	1.67	2	2.5	85
4	1.25	1.43	1.67	2	2.5	95

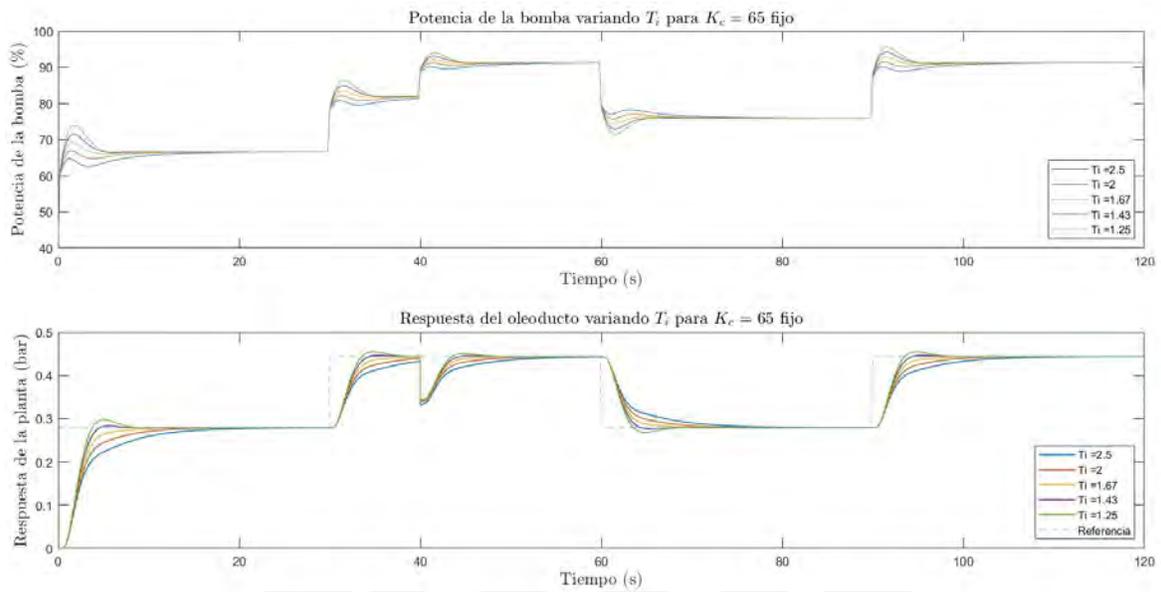


Figura 4.2. Primera prueba para la obtención de los parámetros del PI.

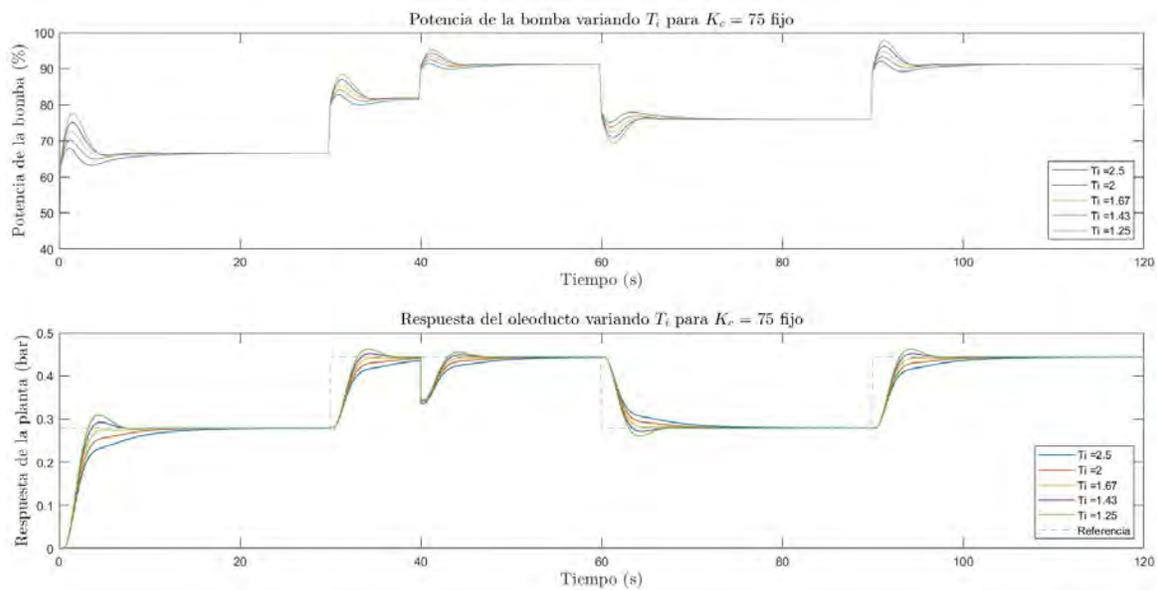


Figura 4.3. Segunda prueba para la obtención de los parámetros del PI.

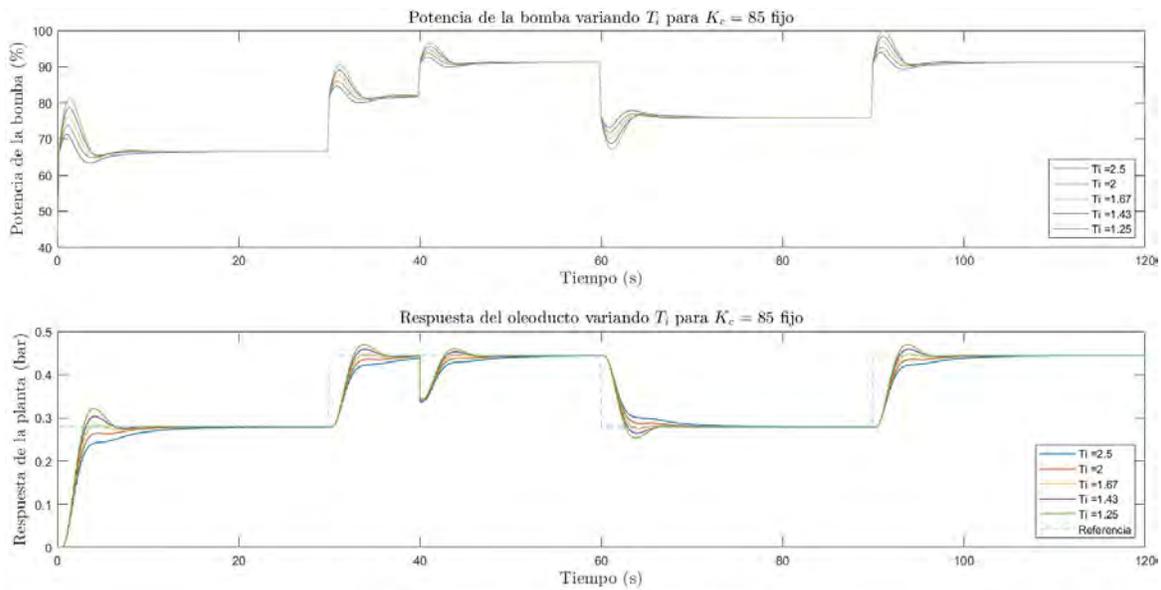


Figura 4.4. Tercera prueba para la obtención de los parámetros del PI.

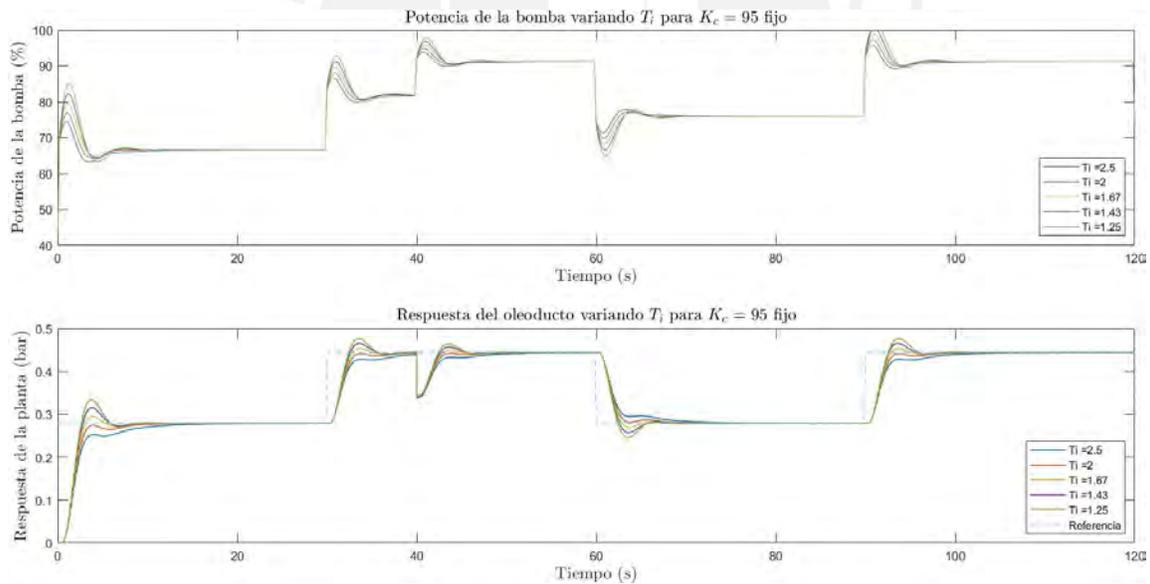


Figura 4.5. Cuarta prueba para la obtención de los parámetros del PI.

En la Tabla 4.2 se exhiben los índices de desempeño del sistema de control de presión con controlador PI considerando diferentes valores de K_c y T_i . De la tabla se observa que los siguientes valores de $K_c=95$ y $T_i=1.67$ son los que producen los mejores índices de desempeño.

Tabla 4.2. Índices de desempeño del sistema de control de presión con controlador PI para distintos valores de K_c y T_i

Prueba	Parámetros del PI		Índices de Desempeño			
	K_c	T_i	ISE	ITSE	IAE	ITAE
1	65	1.25	0.322	9.884	2.82	116.576
		1.43	0.293	8.864	2.27	90.784
		1.67	0.276	8.272	1.905	74.335
		2	0.265	7.916	1.687	64.839
		2.5	0.259	7.72	1.715	66.29
2	75	1.25	0.288	8.739	2.453	100.005
		1.43	0.266	7.964	1.975	77.956
		1.67	0.253	7.54	1.658	63.914
		2	0.246	7.313	1.577	60.456
		2.5	0.244	7.223	1.644	63.488
3	85	1.25	0.263	7.905	2.172	87.517
		1.43	0.246	7.312	1.749	68.293
		1.67	0.237	7.016	1.502	57.418
		2	0.233	6.891	1.527	58.523
		2.5	0.233	6.888	1.614	62.404
5	95	1.25	0.245	7.281	1.949	77.782
		1.43	0.232	6.831	1.571	60.757
		1.67	0.226	6.634	1.445	55.176
		2	0.224	6.595	1.509	57.927
		2.5	0.226	6.67	1.612	62.465

4.2.3 Evaluación del sistema de control de la presión con controladores PI vs DMC

4.2.3.1 Evaluación del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC en condiciones normales

De las pruebas realizadas en el epígrafe anterior se determinó que el mejor controlador PI presenta los siguientes valores de sus parámetros $K_c=95$ y $T_i=1.67$, por lo que se procedió a comparar el desempeño de las respuestas temporales del sistema de control de presión con este controlador y el controlador DMC mejor ajustado en base a los índices de desempeño y sin considerar ruido (ver Figura 4.6 y Tabla 4.3).

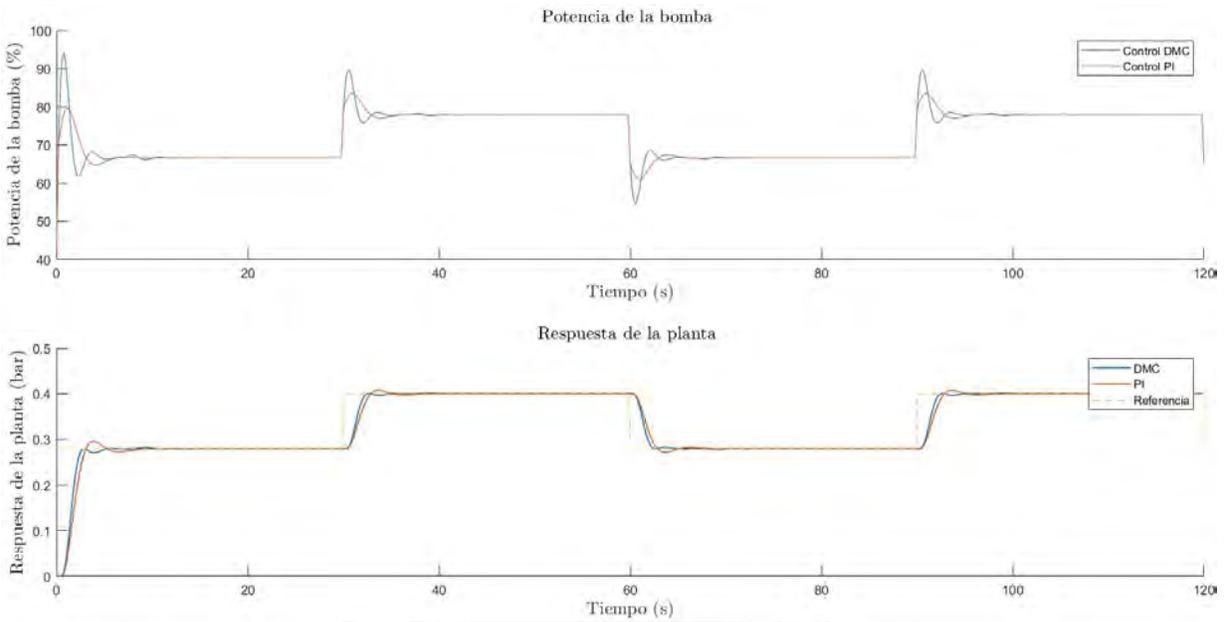


Figura 4.6. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control con controladores PI vs DMC sin ruido.

Tabla 4.3. Evaluación de los índices de desempeño del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC sin ruido

Índice de desempeño	Controlador DMC	Controlador PI
ISE	0.196	0.226
ITSE	5.691	6.635
IAE	1.192	1.445
ITAE	44.8	55.18

Los índices de desempeño que se exhiben en la Tabla 4.3 muestran que los mejores resultados del sistema de control de presión se obtienen con el controlador DMC.

Además el controlador DMC en base a: $t_s=4.47$ s, $t_r=1.28$ s y $M_p = 1$ %, supera al controlador PI, que tiene $t_s=7$ s, $t_r=1.72$ s y $M_p = 6$ %.

4.2.3.2 Evaluación del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando una perturbación

Se realizaron evaluaciones de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC mediante índices de desempeño considerando una perturbación (caída de presión de 0.05 y 0.1 bar) en la salida del sistema (ver Figuras 4.7 y 4.8, y Tabla 4.4)

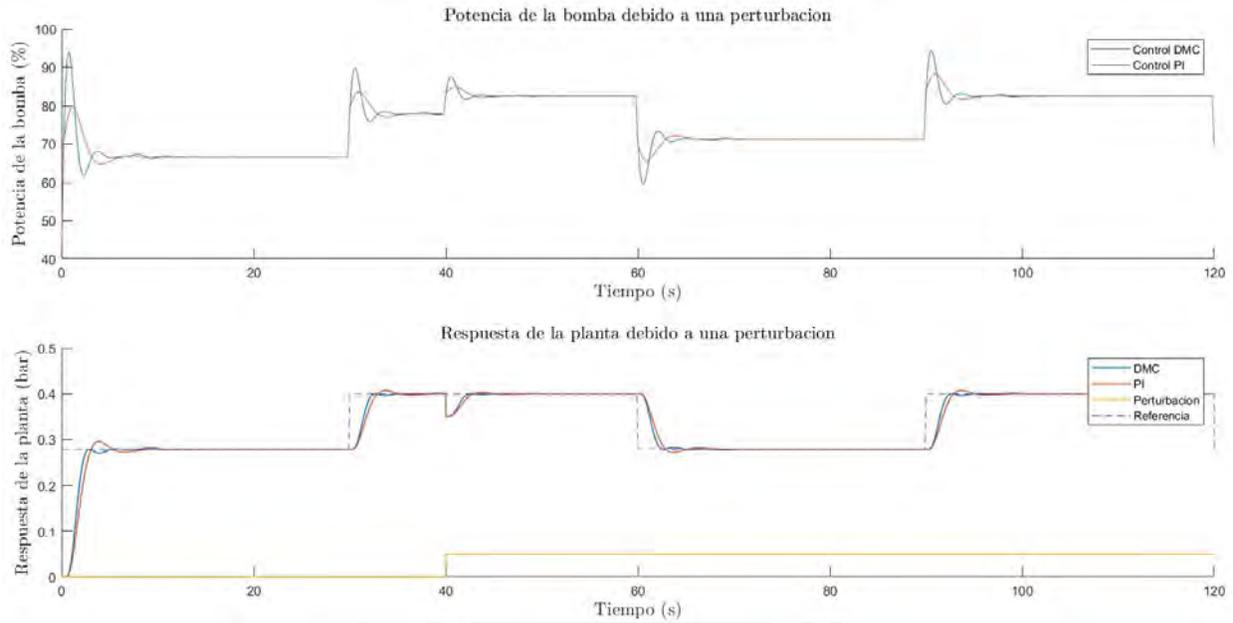


Figura 4.7. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando una caída de presión de 0.05 bar.

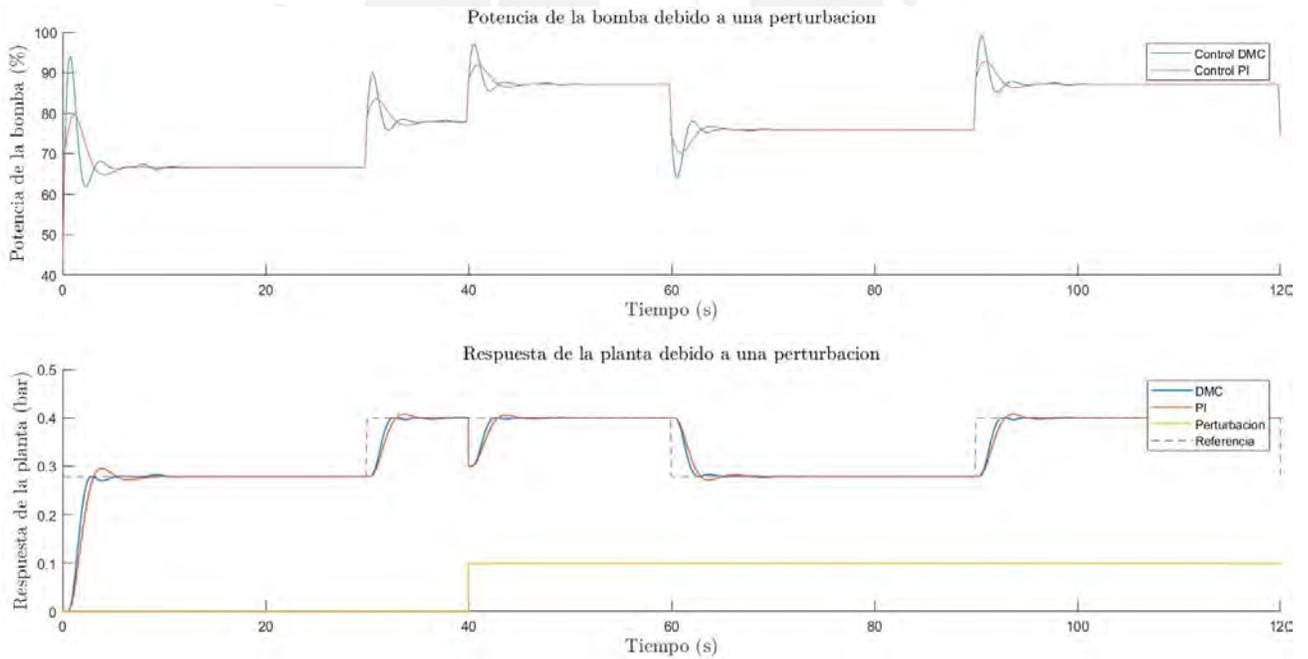


Figura 4.8. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando una caída de presión de 0.1 bar.

Tabla 4.4. Evaluación de los índices de desempeño del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando una perturbación

Índice de desempeño	Controlador DMC caída de 0.05 bar	Controlador DMC caída de 0.1 bar	Controlador PI caída de 0.05 bar	Controlador PI caída de 0.1 bar
ISE	0.156	0.165	0.179	0.189
ITSE	3.21	3.556	3.749	4.152
IAE	1.071	1.144	1.298	1.388
ITAE	35.98	38.98	44.36	48.06

Los índices de desempeño que se exhiben en la Tabla 4.4 muestran que los mejores resultados del sistema de control de presión se obtienen con el controlador DMC.

4.2.3.3 Evaluación del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando un ruido

Se realizaron evaluaciones de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC mediante índices de desempeño considerando un ruido de media 0 y varianza 0.00001 (ver Figura 4.9. y Tabla 4.5)

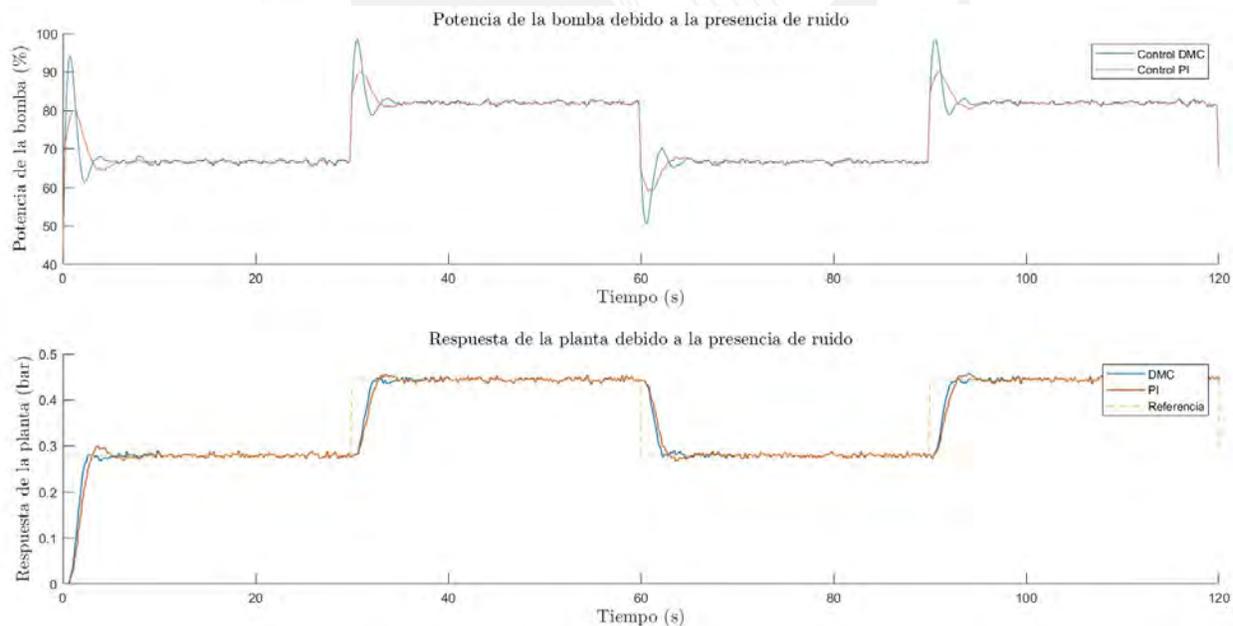


Figura 4.9. Evaluación de las respuestas temporales del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando un ruido.

Tabla 4.5. Evaluación de los índices de desempeño del sistema de control de presión con controladores PI vs DMC considerando un ruido

Índice de desempeño	Controlador DMC con ruido	Controlador PI con ruido
ISE	0.2	0.229
ITSE	5.827	6.769
IAE	1.464	1.701
ITAE	61.84	71.73

Los índices de desempeño que se exhiben en la Tabla 4.5 muestran que los mejores resultados del sistema de control de presión se obtienen con el DMC. Además el DMC en base a: $t_s=2.41$ s, $t_r=1.24$ s y $M_p = 3.9$ %, supera al controlador PI, que tiene $t_s=4.4$ s, $t_r=1.49$ s y $M_p = 7.4$ %.

4.3 Propuesta de implementación del controlador DMC en la planta piloto para el transporte de fluidos de la PUCP

El protocolo OPC (Enlace de Objeto Habilitado para el Control de Procesos) es un estándar abierto de control de procesos que asegura la interoperabilidad y el intercambio seguro de datos en la automatización industrial y otras industrias [87]. Independiente de la plataforma, OPC facilita la comunicación fluida entre dispositivos de diferentes proveedores. La OPC Foundation se encarga de su mantenimiento y desarrollo. Su creciente adopción se debe a su menor costo y fácil implementación, brindando flexibilidad a los usuarios. En la Figura 4.10 se exhibe un diagrama con la arquitectura OPC.

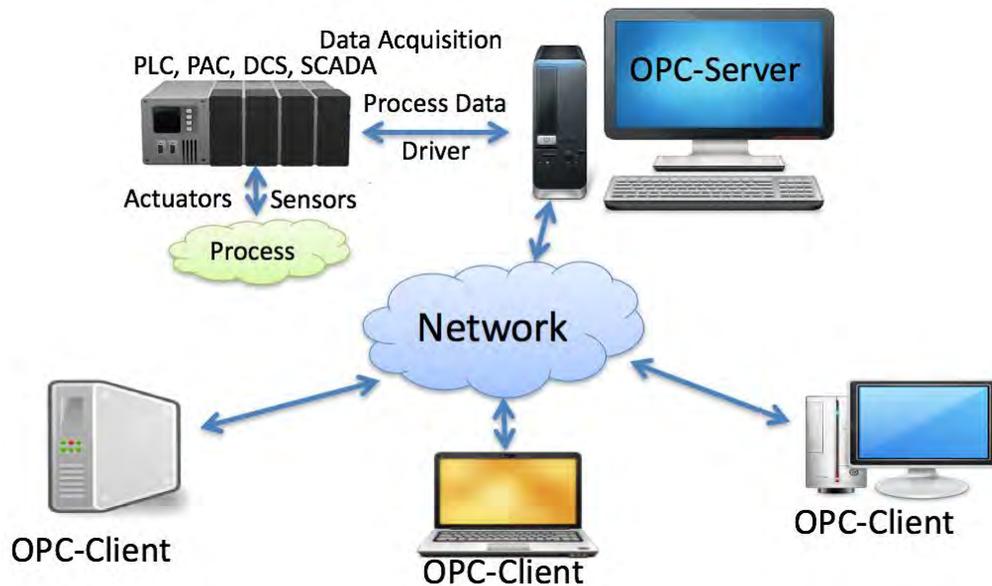


Figura 4.10. Arquitectura OPC [88].

La implementación del controlador DMC en la planta objeto de estudio se propone que se realice mediante una conexión OPC entre un PLC y una PC con Matlab. Esta propuesta de implementación práctica es muy utilizada [89]–[92] y permite la comunicación bidireccional entre el PLC y la PC (Matlab), posibilitando que el controlador DMC programado en MATLAB reciba datos de la planta y envíe los comandos de control a la planta a través del PLC.

El servidor OPC se configura para comunicarse con el PLC utilizando su dirección IP y los identificadores de las variables a controlar. Una vez configurado, el servidor OPC es capaz de leer y escribir en estas variables.

En el lado de la PC (Matlab), se utiliza la toolbox OPC para establecer una conexión con el servidor OPC. Esta conexión se realiza utilizando la dirección IP del servidor OPC y los identificadores de las variables a controlar. Una vez establecida la conexión, Matlab es capaz de leer los datos del PLC a través del servidor OPC y utilizar estos datos para el controlador DMC, ver Figura 4.11.

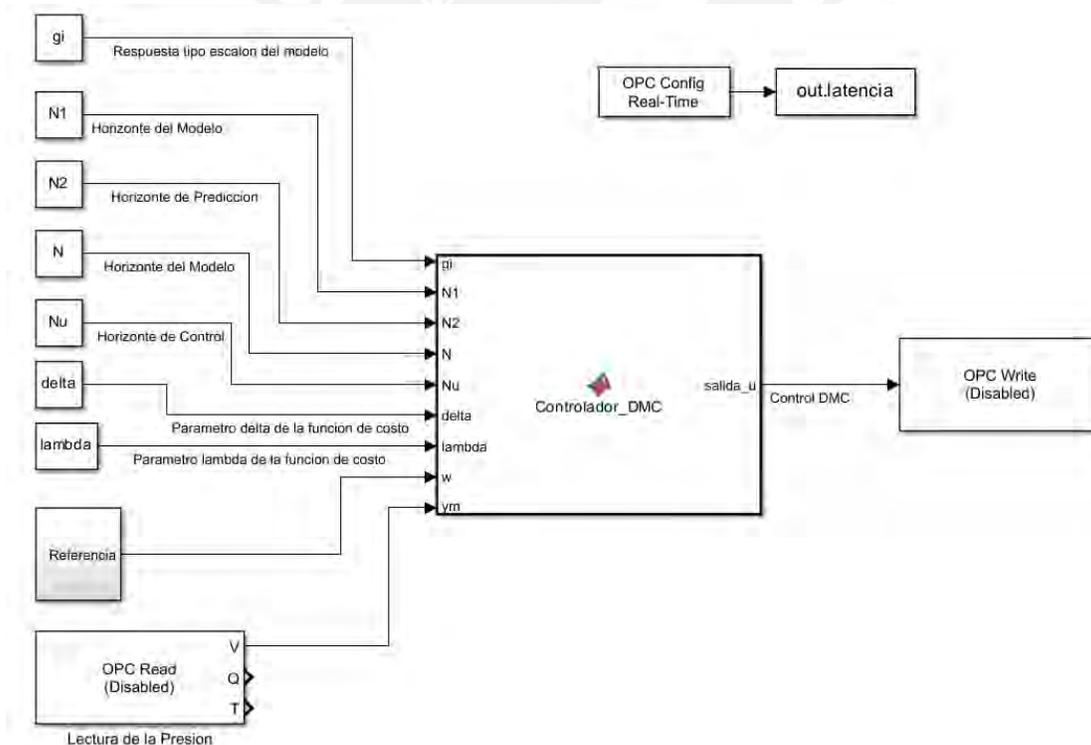


Figura 4.11. Diagrama de bloques propuesto para la comunicación de Matlab (PC) con el servidor OPC.

El controlador DMC, implementado en Matlab, procesa estos datos y genera comandos de control que se envían al PLC a través del servidor OPC. Estos comandos se utilizan para el control de la presión en la planta y obtención del mejor desempeño del sistema de control.

Esta propuesta de implementación aprovecha la flexibilidad y las potencialidades de Matlab para el diseño de controladores, así como la robustez y la fiabilidad de los PLCs para el control de las plantas.

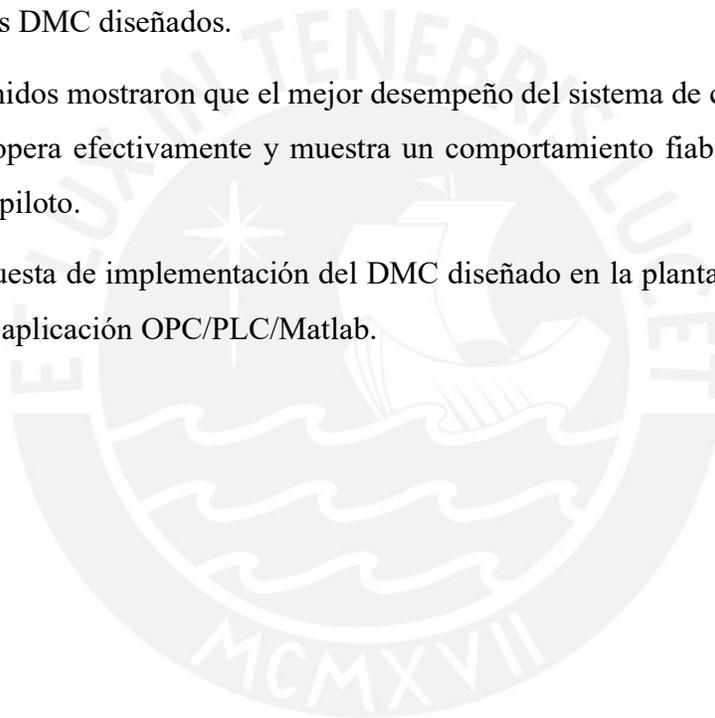
Al utilizar una conexión OPC, se logra una integración fluida entre estos dos sistemas, posibilitando un control preciso y eficiente de la presión en la planta objeto de estudio.

4.4 Conclusiones

Se desarrolló un PI convencional para el control de la presión en la planta objeto de estudio. Se realizaron evaluaciones comparativas basadas en simulaciones del sistema de control con los controladores PID vs DMC diseñados.

Los resultados obtenidos mostraron que el mejor desempeño del sistema de control se obtiene con el DMC. El DMC opera efectivamente y muestra un comportamiento fiable en el control de la presión en la planta piloto.

Se realizó una propuesta de implementación del DMC diseñado en la planta para el transporte de fluidos basada en la aplicación OPC/PLC/Matlab.



Conclusiones generales

Mediante la aplicación de los métodos de identificación de sistemas, se derivó un modelo matemático con una estructura ARMAX de segundo orden de la presión en la planta piloto. Los resultados de validación del modelo derivado mostraron que el mismo describe al comportamiento dinámico de la presión con un índice de desempeño FIT del 84%, el cual se considera adecuado.

Se diseñó un DMC para el control de la presión en la planta objeto de estudio. Además, se realizaron programas en Matlab y Simulink para ejecutar el algoritmo de control desarrollado. Se realizaron evaluaciones del desempeño del DMC mediante simulaciones. Los resultados obtenidos mediante las respuestas temporales mostraron que el DMC permite controlar con un elevado desempeño la presión en la planta piloto.

Se desarrollaron pruebas comparativas mediante simulaciones para evaluar el desempeño del sistema de control con controladores PID vs DMC. Los resultados obtenidos mostraron que el mejor desempeño del sistema de control de la presión en la planta piloto se obtiene cuando se aplica el DMC.

Se realizó una propuesta de implementación del DMC diseñado para el control de presión en la planta piloto mediante la estructura OPC/PLC/Matlab.

Referencias bibliográficas

- [1] Umar M., Riaz Y., and Yousaf I. (2022). Impact of Russian-Ukraine war on clean energy, conventional energy, and metal markets: Evidence from event study approach. *Resources Policy*, 79, 102966.
- [2] Global Energy Monitor. Global Oil Infrastructure Tracker - Global Energy Monitor.
- [3] Awalt J. (2023). Construction Outlook 2023. *Pipeline & Gas Journal*, 250(1).
- [4] Wang S., Jia H., Lu J., and Yang D. (2023). Crude oil transportation route choices: A connectivity reliability-based approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 235, 109254.
- [5] Biezma M. V., Andrés M. A., Agudo D., and Briz E. (2020). Most fatal oil and gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. *Engineering Failure Analysis*, 110, 104446.
- [6] Lu H., Xi D., and Qin G. (2023). Environmental risk of oil pipeline accidents. *Science of the Total Environment*, 874, 162386.
- [7] Lurie, M. (2009). *Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Germany.
- [8] Verde C., Torres L. (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- [9] Zhu G. Y., Henson M. A., and Megan L. (2001). Dynamic modeling and linear model predictive control of gas pipeline networks. *Journal of Process Control*, 11(2), 129–148.
- [10] Åström K. J., y Hägglund T. (2009). *Control PID Avanzado*. Pearson Educación, Madrid, España.
- [11] Vilanova R., and Visioli A. (2012). *PID Control in the Third Millennium*. Springer-Verlag, London, UK.
- [12] Kondratenko Y. P., Kuntsevich V. M., Chikrii A. A., and Gubarev V. F. (2021). *Advanced Control Systems: Theory and Applications*, 1st ed. River Publishers, NY, USA.
- [13] Rodriguez Vazquez J. R., Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano, J. J., and Peran Gonzalez, J. R. (2008). Advanced control system of the steam pressure in a fire-tube boiler. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 11028–11033.
- [14] Camacho E. F., and Bordón C. (2007). *Model Predictive Control*. Springer, London, UK.
- [15] Camacho E. F., y Bordóns C. (2004). Control predictivo: pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1(3), 5–28.
- [16] Rivas-Perez R., Sotomayor-Moriano J., Perez-Zuniga C. G. (2016). Design of a multivariable GPC based on an industrial PC for control of a reverse osmosis unit of a pharmaceutical industry. *Revista*

Mexicana de Ingeniería Química, 15(1), 259–273.

- [17] Razvarz S., Vargas-Jarillo C., Jafari R., and Gegov A. (2019). Flow control of fluid in pipelines using PID controller. *IEEE Access*, 7, 25673-25680.
- [18] Jafari R., Razvarz S., Vargas-Jarillo C., and Yu W. (2019). Control of flow rate in pipeline using PID controller. In *Proceedings of 2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control*, 293–298.
- [19] Vijayalakshmi S., Anuradha C., Ilambirai R. C., and Ganesch V. (2020). Real-time monitoring and control of flow rate in transportation pipelines using Matlab-based interactive GUI and PID controller. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 11(4), 1767–1774.
- [20] Devold H. (2013). *Oil and Gas Production Handbook. An Introduction to Oil and Gas Production, Transport, Refining and Petrochemical Industry*. ABB Oil and Gas, Oslo, Sweden.
- [21] Miesner T. O., and Leffler W. L. (2020). *Oil and Gas Pipelines in Nontechnical Language*, 2nd ed. PennWell Book Lic, NY, USA.
- [22] Mohitpour M., Szabo J., and Van Hardeveld, T. (2004). *Pipeline Operation and Maintenance*. ASME, NY, USA.
- [23] Guo B., Lyons W. C., and Ghalambor A. (2007). *Petroleum Production Engineering: A Computer-Assisted Approach*. Gulf Professional Publishing, Oxford, UK.
- [24] Revie R. W. (2015). *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook*. Wiley, NY, USA.
- [25] Mohitpour M., Golshan H. and Murray A (2007). *Pipeline Design & Construction: A Practical Approach*, Third Edition. ASME Press
- [26] Pharris T. C., and Kolpa R. L. (2008). *Overview of the Design, Construction, and Operation of Interstate Liquid Petroleum Pipelines*.
- [27] Ruiz Ariza J., and Jiménez-Cabas J. (2018). Modeling and simulation of a pipeline transportation process. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, 20–15.
- [28] Hussein H., Aleebay A., and Mahdi Z. (2020). Improving the performance of the pump station in pipe line transportation system using plc controller and remote monitoring. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 765, p. 012050.
- [29] Priyanka E. B., Maheswari C., and Thangavel S. (2018). Online monitoring and control of flow rate in oil pipelines transportation system by using plc based fuzzy-PID controller. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62, 144–151.
- [30] Priyanka E. B., Maheswari C., Thangavel S., and Bala, M. P. (2020). Integrating IoT with LQR-

- PID controller for online surveillance and control of flow and pressure in fluid transportation system. *Journal of Industrial Information Integration*, 17, 100127.
- [31] Priyanka E. B., Maheswari C., and Thangavel S. (2020). Proactive decision making based iot framework for an oil pipeline transportation system. In Proceeding of the *International Conference on Computer Networks, Big Data and IoT*, 108–119.
- [32] Van Pham T., Georges D., and Besancon G. (2014). Predictive control with guaranteed stability for water hammer equations. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 59(2), 465–470.
- [33] Rivas-Perez R., Sotomayor-Moriano J., Pérez-Zuñiga G., and Soto-Angles M. E. (2019). Real-time implementation of an expert model predictive controller in a pilot-scale reverse osmosis plant for brackish and seawater desalination. *Applied Sciences*, 9(14), 2932.
- [34] Rivas-Perez R., Sotomayor Moriano J., and Perez-Zuñiga C.G. (2017). Adaptive expert generalized predictive multivariable control of seawater RO desalination plant for a mineral processing facility. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 10244–10249.
- [35] Rivas Perez R., Prada Moraga C., Peran Gonzalez J. R., and Kovalenko P. I. (2002). Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1), 97–102.
- [36] Pourfard A., Moetamedzadeh H., Madoliat R., and Khanmirza E. (2019). Design of a neural network based predictive controller for natural gas pipelines in transient state. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 62, 275–293.
- [37] Garcia C. A. (2018). MPC under IEC-61499 using low-cost devices for oil pipeline system. In Proceedings of *IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics*, 659–664.
- [38] Cardenas-Cabrera J. (2019). Model predictive control strategies performance evaluation over a pipeline transportation system. *Journal of Control Science and Engineering*, 2019, Article ID 4538632.
- [39] Rivas-Perez R. (1991). Synthesis of optimal stationary automatic control systems of water distribution in main irrigation canal by means of time delay compensation. *Land Reclamation and Water Management*, 74, 77–82.
- [40] Rivas-Perez R. (1984). Technological process control in main canals of irrigation systems, with application to irrigation systems of Cuba. Ph.D. Tesis, Scientific Research Institute on Land Reclamation and Hydraulic Engineering of Ukrainian Academy of Agricultural Sciences (UkrNIIGIM), Ukraine.

- [41] Rios-Mercado R., and Borraz-Sanchez C. (2015). Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review. *Applied Energy*, 147, 536–555.
- [42] Osiadacz A. J. and Chaczykowski M. (2016). Dynamic control for gas pipeline systems. *Archives of Mining Sciences*, 61(1), 69–82.
- [43] Pérez-Zuñiga G., Sotomayor-Moriano J., Rivas-Perez R., and Sánchez-Zurita V. (2021). Distributed fault detection and isolation approach for oil pipelines. *Applied Sciences*, 11(24), 11993.
- [44] Subramanian, N. (2008). *Improving Security of Oil Pipeline SCADA Systems Using Service Oriented Architectures*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- [45] Adegboye M. A., Fung W. K., and Karnik A. (2019). Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches. *Sensors*, 19, 2548.
- [46] Calderon E. M., Rivas R., and Sotomayor J. (2016). Design of an adaptive neuro-fuzzy controller of an irrigation main canal pool. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 471–476.
- [47] Kovalienko P. I., Matzeliuk E. M., and Rivas-Perez R. (1990). Adaptive control of water distribution in main irrigation canals with variable time delay. *Scientific Researches in Hydrotechnique and Land Reclamation*, 32-40.
- [48] Rivas-Perez R., and Pichuguin E. D. (1989). Synthesis of adaptive control systems of water distribution in main irrigation canals. *Land Reclamation and Water Management*, 70, 66–70.
- [49] Wu Y., and Liu G. P. (2019). Adaptive control of a pipeline pressure system using the golden section method. *Control Theory and Applications*. 35(6), p858.
- [50] Saeed N., and Abbod M. (2017). Modelling oil pipelines grid: neuro-fuzzy supervision system. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 9, 1–11.
- [51] Cabas J. J., and Ariza J. D. R. (2018). Modeling and simulation of a pipeline transportation process. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(9).
- [52] Feliu-Batlle V., and Rivas-Perez R. (2020). Design of a robust fractional order controller for burning zone temperature control in an industrial cement rotary kiln. *IFAC-PapersOnLine*, 52(2), 3657–3662.
- [53] Rivas-Perez R., Feliu-Batlle V., Castillo-Garcia F., Sanchez-Rodriguez L., and Linares-Saez A. (2014). Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 23–42.
- [54] Rivas-Perez R, Castillo-Garcia F, Sotomayor-Moriano J, and Feliu-Batlle V. (2014). Design of a

- fractional order PI controller for steam pressure in the steam drum of a bagasse fired boiler. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 1337–1342.
- [55] Castillo-Garcia F., Rivas-Perez R., and Feliu-Batlle V. (2008). Fractional $I\alpha$ controller combined with a Smith predictor for effective water distribution in a main irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 14558–14563.
- [56] Feliu-Batlle V., Rivas-Perez R., Sanchez-Rodriguez L., and Castillo-García F. J. (2008). Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 15535–15540.
- [57] Feliu-Batlle V., Gharab S., and Rivas-Perez R. (2023). Robust fractional order flow control in an oil Pipeline. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 3278–3283.
- [58] Gato L., Henrique J. (2005). Dynamic behavior of high-pressure natural-gas flow in pipelines. *International Journal of Heat Fluid Flow*, 26, 817–825.
- [59] Avila Córdova E. (2023). Desarrollo e implementación de un sistema de supervisión para una planta piloto de transporte de fluidos. Tesis en opción al grado de magister, PUCP, Lima, Perú.
- [60] Russmann J. P. (2023). Dynamic and algebraic observer design for leak detection, size estimation and localization in water pipe systems. Tesis en opción al grado de magister, PUCP, Lima, Perú.
- [61] Nguyen H., and Chan C. (2005). Optimal scheduling of gas pipeline operation using genetic algorithms. In *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Saskatoon, SK, Canada.
- [62] Salas Camacho F. A. (2023). Desarrollo de un sistema de detección y localización de fugas basado en filtro de Kalman extendido para sistemas de transporte de petróleo crudo aplicado al tramo I del Oleoducto Norperuano. Tesis en opción al grado de magister, PUCP, Lima, Perú.
- [63] Yoon M. S., Warren C. B., and Adam S. (2007). *Pipeline System Automation and Control*. ASME Press, NY, USA.
- [64] Razvarz S., Jafari R., and Gegov A. (2021). *Flow Modelling and Control in Pipeline Systems, a Formal Systematic Approach*. Springer Nature Switzerland AG, Switzerland.
- [65] Wen K., Gong J., and Wu Y. (2019). The cascade control of natural gas pipeline systems. *Applied Sciences*, 9, 481.
- [66] Çengel Y. A., and Cimbala J. M. (2020). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. Springer, Berlin, Germany.
- [67] Piña W., Feliu V., and Rivas R. (2018). Direct continuous-time system identification of the

- purification process of the nimotuzumab, a humanized monoclonal antibody. *IEEE Latin America Transactions*, 16(1), 31–37.
- [68] Benitez I. O., Rivas R., Feliu V., Sanchez L. P., and Sanchez L. A. (2016). Fuzzy gain scheduled Smith predictor for temperature control in an industrial steel slab reheating furnace. *IEEE Latin America Transactions*, 14 (11), 4439–4447.
- [69] Phillips C. L., Nagle H. T., and Chakraborty A. (2015). *Digital Control System, Analysis and Design*. Pearson, NY, USA.
- [70] Ljung L. (1999). *System Identification – Theory for the Users*, 2nd ed. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [71] Isermann R. and Münchhof M. (2010). *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany.
- [72] Keesman K. (2011). *System Identification: An Introduction*. Springer Verlag, London, UK.
- [73] Rabbani M. J., Hussain K., Khan A. R., and Ali A. (2013). Model identification and validation for a heating system using Matlab system identification toolbox. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 51(1), 012022.
- [74] Sahoo A., Radhakrishnan T. K., and Rao C. S. (2017). Modeling and control of a real time shell and tube heat exchanger. *Resource-Efficient Technologies*, 3(1), 124–132.
- [75] Rojas Valdez R. D. (2023). Desarrollo de un controlador DMC para el control de la presión del vapor de una caldera pirotubular de una planta de fosfato bicálcico. Tesis en opción al grado de magister, PUCP, Lima, Perú.
- [76] Mena Acha M. Z. (2020). Diseño de un sistema de control predictivo generalizado multivariable para el control de siete niveles de pulpa de un banco de celdas de flotación de minerales de cobre de una planta de procesamiento de minerales. Tesis en opción al grado de magister, PUCP, Lima, Perú.
- [77] Ccarita J. (2018). Diseño de un controlador predictivo generalizado multivariable para el control de una celda de flotación tipo columna utilizada en el proceso de recuperación de cobre. Tesis en opción al grado de magister, PUCP, Lima, Perú.
- [78] Rivas-Perez R., Mendoza-Montalvo J., Misa-LLorca R., and Cesar-Sanchez E. (2024). Control, based on a modified Smith predictor, of temperature in a cement kiln. In Proceedings of IX Simposio Internacional de Electrónica, Automática y Robótica: Diseño, Aplicaciones, Técnicas Avanzadas y Retos Actuales, Informática 2024.

- [79] Rivas-Perez R., Sotomayor-Moriano J., Perez-Zuñiga C.G., and Ccarita J. (2023). Design of a robust MPC for copper recovery in an Industrial flotation column. *IFAC PapersOnLine*, 56(2), 4448–4453.
- [80] Agachi P. S., Cristea M. V., Csavdari A. A., and Szilagyi B. (2017). *Advanced Process Engineering Control*. De Gruyter, Berlin, Germany.
- [81] Grüne L., and Pannek J. (2017). *Nonlinear Model Predictive Control Theory and Algorithms*. Springer, Berlin, Germany.
- [82] Wang L. (2009). Model predictive control: design and implementation using MATLAB. In *Proceedings of 2009 American Control Conference*, 25–26.
- [83] Ellis M., Liu J., and Christofides P. D. (2017). *Economic Model Predictive Control*. Springer, Berlin, Germany.
- [84] Xi Y. and Li D. (2019). *Predictive Control: Fundamentals and Developments*. Springer, Berlin, Germany.
- [85] Raković S. V., and Levine W. (2018). *Handbook of Model Predictive Control*. Springer, Berlin, Germany.
- [86] S. Lahiri, *Multivariable Predictive Control: Applications in Industry*. 2017.
- [87] Schleipen M. (2008). OPC UA supporting the automated engineering of production monitoring and control systems. In *Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 640–647
- [88] Halvorsen P. “What is OPC?”. The Technical Guy a Blog about Technology. <https://www.halvorsen.blog/documents/technology/opc/opc.php> (Accedido: 23-ene-2024)
- [89] Zambrano J. C. and González A. I. (2013). Implementación de un algoritmo de control predictivo en espacio de estados sobre una plataforma de simulación desarrollada en Matlab. *Ingenius*, 9, 5–14.
- [90] Imad R., Kairuz V., and Gnzalez Santos A. I. (2015). Controladores MPC y PID con autoajuste para un proceso de dinámica rápida a través de MATLAB/Simulink y OPC. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 36(3), 80–93.
- [91] Bhaskarwar T., Chile R., Aole S., and Elamvazuthi I. (2019). Remote monitoring of coupled tank accompanied by PLC/OPC/MATLAB architecture. *Proceedings of 2019 IEEE Student Conference on Research and Development*, 328–332.
- [92] Salcedo J., Feliu V., and Rivas R. (2021). State feedback temperature control based on a Smith predictor in a precalciner of a cement kiln. *IEEE Latin America Transactions*, 19(1), 138–146.

ANEXOS

Anexo 1: Código de Control_DMC_Oleoducto.m

```
%% Modelo ARMAX del oleoducto
% Orden del retraso de la entrada
nk=1;
% Coeficientes del polinomio autoregresivo
A=[1.0000 -2.4841 2.0561 -0.5682];
% Coeficientes del polinomio de media móvil
B=[0 0.0696 -0.2978 0.6369]*1e-4;
% Coeficientes del polinomio de entrada exógena
C=[1.0000 -0.8550];
% Tiempo de muestreo del modelo ARMAX obtenido
Ts=0.1;
% Modelo ARMAX como objeto de Matlab
Oleoducto_ARMAX=idpoly(A,B,C,[],[],[],Ts);
%% Parametros de ajuste del controlador DMC
% Tiempo de muestreo del DMC
Ts_DMC=0.2;
% Horizonte mínimo
N1=4;
% Horizonte del modelo
N=35;
% Horizonte de prediccion
N2=35;
% Horizonte de control
Nu=2;
% Peso Delta de la función de costo
delta=2.2;
delta=delta*eye(N2);
% Peso Lambda de la función de costo
lambda=0.0001;
```

```

%% Modelo de predicción tipo escalón
% Respuesta al escalón
gi=step(Oleoducto_ARMAX,0:Ts:40);
gi=gi(1:Ts_DMC/Ts:end);
%% Simulacion
% Tiempo de Simulacion
T_sim=120;
% Ejecucion del archivo de Simulink
set_param('Simulacion_Proceso_Oleoducto','SimulationCommand','connect')
set_param('Simulacion_Proceso_Oleoducto','SimulationCommand','start')

```

Anexo 2: Código interno del Bloque Controlador_DMC en Matlab

```

function salida_u =Controlador_DMC(gi,N1,N2,N,Nu,delta,lambda,w,ym)
    persistent delta_u delta_ulibre K u umax umin ;
    if isempty(u)
        %% Calculo de la Matriz G
        G=zeros(N2,Nu);
        for i=1:Nu
            G(i:end,i)=gi(N1:N2-i+N1);
        end
        %% Calculo de la matriz M y la ganancia K
        M=inv(G'*delta*G + lambda*eye(size(G'*G)))*G'*delta';
        % Solo se necesita la primera la fila
        K=M(1,:);
        %% Condiciones iniciales
        u00=40.68;
        delta_ulibre=zeros(1,N);
        u=u00;
        umax=100; % Límite máximo de la señal de control
        umin=u00; % Límite mínimo de la señal de control
    end
    salida_u = u;

```

```

salida_u=u;
else
    %% CALCULO DE LA RESPUESTA LIBRE
    % Inicializacion de la Respuesta Libre
    f=zeros(1,N2);
    % Inicializacion de Delta_g
    delta_g=zeros(1,N);
    for kk=1:N2
        for i=1:N
            delta_g(i)=gi(kk+i)-gi(i);
        end
        % Respuesta libre
        f(kk)=ym+delta_g*delta_ulibre';
    end
    % Calculo de la ley de control
    e0=(w-f);
    delta_u=K*e0;
    u=u+delta_u;
    if u>umax
        u=umax; % Límite Máximo
    elseif u<umin
        u=umin; % Límite Mínimo
    end
    % Actualiza delta_ulibre
    delta_ulibre=[delta_u delta_ulibre(1:N-1)];
    salida_u=u;
end
end
end

```

Anexo 3: Código del bloque Controlador_PI en Matlab

```
function u = Controlador_PI(e,Kc,Ti)
% Definición de variables persistentes
persistent e_ant u_pi Ts umax umin
if isempty(u_pi)
% Inicialización de las variables en la primera ejecución
Ts=0.2; % Tiempo de muestreo del controlador PI
e_ant=0; % Error anterior
u_pi=40.68; % Valor inicial de la salida del controlador PI
umax=100; % Límite máximo de la señal de control
umin=u_pi; % Límite mínimo de la señal de control
u=u_pi; % Salida del controlador
else
% Cálculo del valor de control u en el paso k
% Actualización de la salida del controlador PI
u_pi = Kc * (1 + (1/Ti) * Ts) * e - Kc * e_ant + u_pi;
e_ant=e; % Actualización del error anterior
if u_pi>umax
u_pi=umax; % Límite Máximo
elseif u<umin
u_pi=umin; % Límite Mínimo
end
u=u_pi; % Salida del controlador
end
end
```

Anexo 4: Código en texto estructurado de un AIO para la generación de la PRBS en la planta

```
1
2 case inicializacion of
3   0:
4   npi:=3.14159265;
5   TPRBS:=0.1;
6   nperiod:=5;
7   umax:=85;
8   umin:=65;
9   Test:=2.6531;
10  Ts:=0.1;//Test/40;
11  Tds:=0.5;
12  Tdm:=Tds/Ts;
13  Tmax:=(2*npi*Ts/0.15)/TPRBS;
14  Tmin:=(2*npi*Ts/5)/TPRBS;
15  Tpulso:=Tmin+Tmax;
16  contador:=0;
17  periodoactual:=0;
18  reset:=0;
19   1:
20   if reset=0 AND inicializacion=1 then
21
22   if contador=0 then
23   percent:=(rand*(Tmax-Tmin)+Tmin);
24   end_if;
25   if percent>Tmax then
26     percent:=Tmax;
27   elsif percent<Tmin then
28     percent:=Tmin;
29   end_if;
30
31   if percent>contador then
32     u_salida:=(umax-umin)*1+umin;
33   else
34     u_salida:=umin;
35   end_if;
36   contador:=contador+1;
37   if contador=Tpulso then;
38     contador:=0;
39     periodoactual:=periodoactual+1;
40   end_if;
41
42   if periodoactual=nperiod then
43     u_salida:=0;
44     reset:=1;
45   end_if;
46 end_if;
47 end_case;
48
```

Anexo 5: Implementacion de los AIOS necesarios en Main Program para la identificación.

