

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL
PREDICTIVO GENERALIZADO PARA LA
DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL CANAL
PRINCIPAL DEL VALLE DE CAÑETE”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN
CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

**AUTORES: BORDA MARCATINCO DANTE CÉSAR
FERNÁNDEZ QUISPE NEDIN ESTEBAN**

Callao-2020
PERÚ

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO

Dr. Ing.	: JUAN HERBERT GRADOS GAMARRA	PRESIDENTE
Dr. Ing.	: NICANOR RAÚL BENITES SARAVIA	SECRETARIO
Dr. Ing.	: JACOB ASTOCONDOR VILLAR	MIEMBRO
MSc. Ing	: RUSELL CÓRDOVA RUIZ	MIEMBRO
Dr.	: MARCELO NEMESIO DAMAS NIÑO	ASESOR

N° DE LIBROS	: 01
FOLIO	: 098
FECHA DE APROBACIÓN	: 26 de agosto 2020
RESOLUCIÓN DIRECTORAL	: 013-2020-DUPFIEE

DEDICATORIA

Dedicado y a nuestros padres por su apoyo incondicional gracias a ustedes hemos llegado hasta aquí y convertírnos en lo que somos.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos en primer lugar al asesor Dr. Marcelo Nemesio Damas Niño, por sus consejos y recomendaciones.

Agradezco también a la plana docente de la Maestría en Ciencias de la Electrónica de la Universidad Nacional del Callao por las enseñanzas proporcionadas a lo largo de los estudios de Maestría.

Agradezco a los agrónomos Abel Sánchez Candela, Percy Raul Peralta Gomez y al ingeniero Erik Laura Bravo por sus orientaciones y recomendaciones sumamente importantes para la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	15
RESUMO	16
INTRODUCCIÓN	17
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1. Descripción de la realidad problemática	18
1.2. Formulación del problema	19
1.2.1. Problema general	19
1.2.2. Problemas específicos	19
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo general	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
1.4. Justificación	20
1.4.1. Naturaleza	20
1.4.2. Teórica	20
1.4.3. Magnitud	20
1.4.4. Legal	20
1.4.5. Trascendencia	21
1.4.6. Económica	21
1.5. Limitantes de la investigación	21
1.5.1. Teórica	21
1.5.2. Temporal	21
1.5.3. Espacial	21
II. MARCO TEÓRICO	22
2.1. Antecedentes	22

2.1.1. Ámbito internacional	22
2.1.2. Ámbito nacional	24
2.2. Bases teóricas	27
2.2.1. Comportamiento dinámico de un tramo principal	28
2.2.2. Modelo paramétrico.	30
2.2.3. Control predictivo	36
2.3. Conceptual	60
2.3.1. Automatización de canales principales de riego	60
2.4. Definición de términos básicos	77
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	81
3.1. Hipótesis	81
3.2. Definición conceptual de variables	81
3.2.1. Operacionalización de variables	82
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	83
4.1. Tipo y Diseño de la investigación	83
4.1.1. Tipo	83
4.1.2. Diseño	83
4.2. Método de investigación	89
4.3. Población y Muestra	89
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	89
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	93
4.6. Análisis y procesamiento de datos	95
4.6.1. Desarrollo del experimento.	95
4.6.2. Tratamiento previo de los datos.	101
4.6.3. Estimación de los parámetros del modelo del canal de riego	104
4.6.4. Validación del modelo del canal	106

4.6.5. Implementación del sistema GPC desarrollado en MATLAB-SIMULINK	119
V. RESULTADOS	127
5.1. Resultados descriptivos	127
5.1.1. Modelo matemático del comportamiento dinámico de un tramo del canal viejo imperial	127
5.2. Resultados inferenciales	128
5.2.1. Simulación del GPC desarrollado.	128
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	141
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	141
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	142
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	142
CONCLUSIONES	143
RECOMENDACIONES	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
ANEXOS	151
A. Matriz de consistencia	152
B. Sensor de ultra sonido UK1D/E2-0EUL	153
C. Módulo de adquisición de datos Advantech ADAM-4017+-CE	154
D. Convertidor de interfaz USB a RS485	156
E. Análisis de datos en Matlab	157

TABLAS DE CONTENIDO

Tabla 1.	Metas físicas alcanzadas durante los años 1998-2006	25
Tabla 2.	Operacionalización de variables	82
Tabla 3.	Parámetro de operación del canal viejo imperial	93
Tabla 4.	Ordenes de los polinomios $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ y $C(q^{-1})$	104
Tabla 5.	Parámetros estimados del polinomio $A(q_1)$ de las estructuras de modelos ARX y ARMAX.	105
Tabla 6.	Parámetros estimados del polinomio $B(q^{-1})$ de las estructuras de modelos ARX, ARMAX y OE.	105
Tabla 7.	Parámetros estimados del polinomio $C(q^{-1})$ de la estructura de modelo ARMAX.	106
Tabla 8.	Parámetros estimados del polinomio $F(q^{-1})$ de la estructura de modelo OE.	106
Tabla 9.	Valores del error final de predicción (FPE) para los modelos estimados.	107
Tabla 10.	Índice de ajuste FIT de los modelos estimados.	115
Tabla 11.	Parámetros estimados del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1].	117
Tabla 12.	Parámetros utilizados para las pruebas de simulación.	128

TABLA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagramas en bloques de las estructuras	32
Figura 2.	Diagrama de señales del control predictivo basado en modelo.	41
Figura 3.	Estructura del control predictivo basado en modelos.	42
Figura 4.	Respuesta al impulso.	45
Figura 5.	Respuesta al escalón.	46
Figura 6.	Trayectorias de referencia interna.	50
Figura 7.	Representación esquemática de un canal principal de riego.	62
Figura 8.	Diagrama simplificado de una compuerta sumergible.	63
Figura 9.	Diagrama simplificado de una compuerta por desbordamiento.	63
Figura 10.	Diagrama de la estrategia de control feedforward.	66
Figura 11.	Diagrama de la estrategia de control feedback.	67
Figura 12.	Diagrama en bloques del sistema de control feedforward.	67
Figura 13.	Diagrama en bloques del sistema de control feedbad.	68
Figura 14.	Diagrama en bloques del sistema de control feedbad y feed- forward.	68
Figura 15.	Esquema de control aguas abajo.	69
Figura 16.	Esquema de control aguas arriba.	69
Figura 17.	Esquema de control mixto.	70
Figura 18.	Esquema simplificado de un sistema de control local.	74
Figura 19.	Esquema simplificado de un sistema de control local con sensor alejado.	75
Figura 20.	Esquema simplificado de un sistema de control semi-local.	75
Figura 21.	Esquema simplificado de un sistema de control centralizado.	76
Figura 22.	Esquema simplificado de un sistema de control jerárquico.	77
Figura 23.	Diagrama de flujo del esquema general de identificación de sistemas.	84

Figura 24.	Diagrama de flujo de identificación de sistemas.	86
Figura 25.	Diagrama de flujo del sistema de GPC.	88
Figura 26.	Esquema simplificado del canal viejo imperial.	90
Figura 27.	Tramo del canal viejo imperial.	90
Figura 28.	Compuerta número 36 del canal viejo imperial.	91
Figura 29.	Compuerta tipo tarjeta.	91
Figura 30.	Esquema simplificado del canal viejo imperial.	92
Figura 31.	Esquema de adquisición de datos	94
Figura 32.	Datos adquiridos en el experimento	94
Figura 33.	Esquema simplificado del experimento con señal escalón.	97
Figura 34.	Resultados del experimento con señal escalón en MATLAB.	98
Figura 35.	Esquema simplificado del experimento con señal binaria pseudoaleatoria.	100
Figura 36.	Resultados del experimento con señal SBPA.	101
Figura 37.	Resultados del tratamiento de datos mediante MATLAB.	103
Figura 38.	División de datos para la identificación y validación.	103
Figura 39.	ARX de orden $n_a = n_b = 2$ y $d = 1$	108
Figura 40.	ARMAX de orden $n_a = n_b = n_c = 2$ y $d = 1$	108
Figura 41.	OE de orden $n_b = n_f = 2$ y $d = 1$	109
Figura 42.	ARX de orden $n_a = n_b = 3$ y $d = 1$	109
Figura 43.	ARMAX de orden $n_a = n_b = n_c = 3$ y $d = 1$	110
Figura 44.	OE de orden $n_b = n_f = 3$ y $d = 1$	110
Figura 45.	ARX de orden $n_a = n_b = 4$ y $d = 1$	111
Figura 46.	ARMAX de orden $n_a = n_b = n_c = 4$ y $d = 1$	111
Figura 47.	OE de orden $n_b = n_f = 4$ y $d = 1$	112
Figura 48.	Resultados de validación cruzada del modelo con estructura ARX [2 2 1].	113

Figura 49. Resultados de validación cruzada del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1].	114
Figura 50. Resultados de validación cruzada del modelo con estructura OE [2 2 1].	114
Figura 51. Resultados del análisis de residuos del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1]	116
Figura 52. Respuesta impulso del modelo con estructura ARMAX[2 2 2 1]	118
Figura 53. Respuesta escalón del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1]	118
Figura 54. Diagrama de Bode del modelo con estructura ARMAX[2 2 2 1]	119
Figura 55. Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del GPC.	121
Figura 56. Diagrama en bloques de la implementación en Simulink de la trayectoria de referencia.	121
Figura 57. Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del optimizador.	122
Figura 58. Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del modelo predictor.	123
Figura 59. Diagrama en bloques de la implementación en Simulink de los bloques Acumulador mostrados en la Fig.58	124
Figura 60. Diagrama en bloques del modelo del proceso objeto de estudio.	125
Figura 61. Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del sistema de control con controlador GPC del tramo de canal de riego objeto de estudio.	125
Figura 62. Configuración de los parámetros de simulación de Simulink.	126

Figura 63. Resultados de la simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 0.35$	129
Figura 64. Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 0.35$	130
Figura 65. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 1000$	130
Figura 66. Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 1000$	131
Figura 67. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 100$	132
Figura 68. Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 100$	132
Figura 69. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 1000$	133
Figura 70. Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 100$	134
Figura 71. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$	135
Figura 72. Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$	136
Figura 73. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 0.01.	137
Figura 74. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 0.1.	137
Figura 75. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 1.	138
Figura 76. Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y y señal de ruido con varianza de 2.	138

Figura 77. Resultados de simulación de la salida del sistema de control frente a una referencia externa variable.	139
Figura 78. Resultados de simulación de la señal de control del sistema frente a una referencia externa variable.	140

RESUMEN

La aplicación de métodos de control automático a los canales de riego es una forma de mejorar la gestión de los sistemas de riego. Las dificultades que presentan estos sistemas hidráulicos, como la no linealidad, los retrasos y las perturbaciones incontroladas, hacen que la elección de un sistema automático o método de control se convierta en un desafío. Por lo tanto se debe estudiar la aplicabilidad de las estrategias de control que podrían compensar el retraso y superar la no linealidad del sistema. El método propuesto en esta tesis es el denominado Control Predictivo Generalizado (GPC) en el canal de riego viejo imperial Cañete, para lo cual es importante tener una adecuada descripción general del modelado de flujo de canales abiertos, según los principios básicos del GPC. Siendo el objetivo, regular el nivel de agua aguas abajo de cada alcance controlando las descargas aguas arriba y, por lo tanto, las aperturas de las compuertas.

La primera parte de este trabajo consiste en la recopilación de información correspondiente a la dinámica de canales de riego, posteriormente se revisará la teoría necesaria acerca del control predictivo generalizado.

La segunda parte desarrollaremos un experimento de identificación del comportamiento dinámico de la variación de nivel de agua en el canal de riego que es objeto de estudio. Se obtiene un modelo matemático lineal discreto de segundo orden que describe el comportamiento dinámico del canal de riego.

En la tercera parte desarrollamos el diseño del sistema de control predictivo generalizado (GPC) de la planta objeto de estudio, para controlar la apertura de la compuerta, el cual se implementa en el entorno de MATLAB-SIMULINK mediante la simulación estudiar su efectividad, así como sus prestaciones.

En el trabajo se muestra el diseño de cada etapa del GPC, los resultados obtenidos y las recomendaciones para su implementación.

RESUMO

A aplicação de métodos de controle automático aos canais de irrigação é uma forma de melhorar o gerenciamento dos sistemas de irrigação. As dificuldades que esses sistemas hidráulicos apresentam, como não linearidade, atrasos e distúrbios não controlados, tornam a escolha de um sistema automático ou método de controle um desafio. Portanto, deve-se estudar a aplicabilidade de estratégias de controle que possam compensar o atraso e superar a não linearidade do sistema. O método proposto nesta tese é o chamado Controle Preditivo Generalizado (GPC) no antigo canal de irrigação imperial de Cañete, para o qual é importante ter uma descrição geral adequada da modelagem do escoamento em canal aberto, de acordo com os princípios básicos do GPC. O objetivo é regular o nível d'água a jusante de cada escopo, controlando as descargas a montante e, portanto, as aberturas das comportas.

A primeira parte deste trabalho consiste na compilação de informações correspondentes à dinâmica de canais de irrigação, posteriormente a necessária teoria sobre controle preditivo generalizado será revisada.

Na segunda parte, desenvolveremos um experimento para identificar o comportamento dinâmico da variação do nível de água no canal de irrigação que é objeto de estudo. Um modelo matemático linear discreto de segunda ordem é obtido e descreve o comportamento dinâmico do canal de irrigação.

Na terceira parte desenvolvemos o projeto do sistema de controle preditivo generalizado (GPC) da planta em estudo, para controlar a abertura da comporta, o qual é implementado no ambiente MATLAB-SIMULINK através de simulação, estudando sua eficácia, assim como seus benefícios.

O trabalho mostra o desenho de cada etapa do CPG, os resultados obtidos e as recomendações para sua implementação.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad no existe el uso de automatización para la distribución de agua sobre canales de riego en el Valle de Cañete, el uso de esta herramienta ayudaría a mejorar la eficiencia y la distribución del agua de acuerdo a la demanda de los usuarios regantes así como la población en general.

Las investigaciones en diversos países del mundo muestran que una alternativa importante para aumentar la eficiencia y distribución de agua en los canales principales de riego consiste en la aplicación de sistemas efectivos de control automático (control PID, control neuro difuso, control adaptativo, control robusto, etc), los cuales garanticen la obtención de una relación estricta entre las requerimiento de los diferentes regantes y la entrega de este recurso.

Por tanto, uno de los grandes desafíos mundiales del siglo pasado y actual es el consumo sostenible de agua, como se ha reconocido en distintos foros internacionales en los últimos años. Desde el punto de vista agrícola, la satisfacción de las necesidades alimenticias de la población mundial frente a las previsibles restricciones hídricas pasa por la mejora en eficiencia y productividad del regadío, objetivo que sólo podrá ser alcanzado mediante una mejora tecnológica de sus sistemas de control. Sin duda, la aplicación de sistemas efectivos de control en todos los eslabones de la distribución de agua de riego juega un papel transcendental en la necesaria modernización tecnológica de estos sistemas [38].

En esta tesis tratamos sobre el reparto de agua en el canal viejo imperial para tierras de cultivos, donde utilizaremos control automático, para mejorar la eficiencia en la distribución del agua de acuerdo a la demanda, dado que la forma de reparto de los canales es mediante un operador quien tiene que recorrer 77 compuertas del canal viejo imperial para cumplir la demanda de agua solicitada por cada regante.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el contexto de control automático un canal principal de riego es un sistema con grandes retardos de tiempo y sometido al efecto de perturbaciones externas no medibles. Por lo que es considerado como un sistema con comportamiento dinámico complejo, lo cual dificulta su control [38, 39].

Tradicionalmente el manejo de los canales de riego ha tenido una baja eficiencia. La cantidad de agua que reciben las cosechas representa una pequeña fracción de la cantidad de agua que se envía desde las fuentes de suministro. Por otro lado, la modernización de los canales usualmente mejora la eficiencia y provee un mejor servicio al usuario. Por tanto, el control automático se muestra como un posible método para la mejora de la operatividad y al mismo tiempo mejorar la calidad de servicio con un tiempo puntual de respuesta, para un determinado servicio [26].

1.1. Descripción de la realidad problemática

El canal viejo imperial es operado mediante un sistema de riego por inundación, posee 77 compuertas, donde cada una de ellas debe ser manipulada por un operario para distribuir el agua durante un determinado tiempo (puede ser una o más horas dependiendo de la necesidad de cada agricultor).

En consecuencia, el sistema al ser controlado por un operario genera baja eficiencia en la conducción y distribución del recurso hídrico, además provocando que se generen importantes pérdidas de esta.

Nuestra investigación está dirigida al desarrollo de un tipo de controlador avanzado, para controlar la distribución de agua en el canal viejo imperial del valle de Cañete, constituye un problema de gran interés en especial para la provincia de Cañete.

¿Será posible controlar la distribución del agua en el canal Viejo Imperial?

1.2. Formulación del problema

El funcionamiento del canal viejo imperial es deficiente debido a que no cuenta con un sistema de control automático, los cuales no posibilitan cumplir con las exigencias de eficiencia y operatividad del proceso de distribución de agua.

1.2.1. Problema general

¿Cómo diseñamos un sistema de control automático que permita la regulación de las compuertas de regadío de la zona agraria del valle de Cañete?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del canal viejo imperial?
- ¿Cómo diseñar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución de agua en canal viejo imperial?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control automático, en la zona agraria del valle de Cañete, para mejorar la distribución del agua en el sector agrícola.

1.3.2. Objetivos específicos

- Obtener mediante la técnica de identificación experimental de sistemas, un modelo matemático que describa de forma adecuada el comportamiento

dinámico de un tramo del canal viejo imperial.

- Diseñar y analizar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución del agua en el canal viejo imperial.

1.4. Justificación

La ejecución del presente trabajo de investigación se justifica por su:

1.4.1. Naturaleza

No existe un sistema de automatización para controlar el reparto de agua en el canal viejo imperial, lo que se considera una investigación inédita en el área geográfica.

1.4.2. Teórica

La teoría obtenida podría aplicarse a los demás canales comprendidos en el río Cañete para el buen uso del recurso hídrico. Dicha teoría podría ser de mucha utilidad a la junta de usuarios del sub distrito de riego Cañete en particular a la junta de usuarios del canal viejo imperial.

1.4.3. Magnitud

Gran parte del territorio de la provincia de Cañete está destinado a la actividad agrícola, la distribución del agua es muy importante debido que es un recurso que escasea en ciertas temporadas del año.

1.4.4. Legal

Este trabajo está desarrollado en el marco de la “LEY GENERAL DEL AGUA” Decreto Ley N° 1772, elaborada por el Ministerio de Agricultura. Además de los

proyectos publicados en la Autoridad Nacional del Agua (ANA) donde se obtendrá información relevante sobre el río Cañete.

1.4.5. Trascendencia

Con el desarrollo de esta tesis se podría ampliar a los otros 6 canales restantes que conforman el río Cañete.

1.4.6. Económica

El desarrollo de la tesis permitirá un reparto óptimo del recurso hídrico que reducirá el consumo de agua y en consecuencia podría reducir el costo.

1.5. Limitantes de la investigación

1.5.1. Teórica

No existen trabajos de investigación sobre el control automático de compuertas en el canal viejo imperial.

1.5.2. Temporal

Esta investigación es longitudinal se realizó con cierta rapidez por estar correctamente planteada, se inicio en diciembre del 2018 y terminó en noviembre del 2019.

1.5.3. Espacial

Nuestras unidades de análisis se encuentran en la provincia de Cañete departamento Lima. La investigación comprende el canal viejo imperial ubicado en la provincia de Cañete, departamento de Lima.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Los albores de la automatización de canales de riego comenzaron antes de 1950 y se caracterizaban por el uso de compuertas hidráulicas autocontroladas. En las décadas de 1960 y 1970, los controladores electromecánicos fueron desarrollados e instalados en EEUU. Posteriormente se realizó el control local con la implementación de controladores lógico programables PLC [5]; y con el advenimiento de computadores personales, las simulaciones de modelos de canales de flujo con dinámica complicada fueron aplicados en combinación con algoritmos de control [5, 9]. Esta aproximación permitió avances significativos en la ingeniería de control y automatización de canales.

2.1.1. Ámbito internacional

En la revisión de investigaciones relacionadas al desarrollo e implementación de sistema de control de canales de riego encontramos los siguientes trabajos:

Rivas Perez Raul y Feliu Batlle Vicente (2018), en su trabajo de investigación “Identificación del primer tramo del canal principal de riego Imperial de Aragón”. En el presente trabajo se ofrece un modelo matemático de la variación del nivel del agua en el primer tramo del canal principal de riego Imperial de Aragón perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro, obtenido mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas. Se desarrolla el procedimiento completo de identificación de sistemas desde el diseño del experimento hasta la validación del modelo, considerando los conocimientos físicos previos. Se demuestra que un modelo lineal, con estructura ARMAX, segundo orden y retardo de tiempo, puede describir de forma adecuada el comportamiento dinámico de un tramo de un canal de riego. Los resultados de la validación del

modelo obtenido muestran que el mismo reproduce con una elevada exactitud los datos observados, lo que fundamenta la aplicación del modelo obtenido en el diseño de sistemas efectivos de control y/o con fines de predicción.

Cuenca Tinitana Julio y Rivas Perez Raul, (2012), en su trabajo de investigación titulado “Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribución del agua en un tramo de un canal principal de riego”. En el presente trabajo se propone un controlador predictivo para el control efectivo de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego, con el propósito de brindar una solución para mejorar la operación y reducir las pérdidas de agua. La investigación se desarrolló en base a ensayos desarrollados en el VI tramo del canal principal de riego “Güira de Melena”, ubicado en la Habana, Cuba. Se obtuvo un modelo matemático del tramo del canal mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas. Se diseñó el sistema de control utilizando un controlador predictivo generalizado (GPC). Finalmente, se desarrolló una propuesta de implementación de controlador diseñado utilizando las herramientas MATLAB-SIMULINK y mediante simulación se realizaron evaluaciones sobre el comportamiento dinámico del sistema desarrollado. Los resultados obtenidos mostraron la efectividad del sistema de control desarrollado.

Bordóns Alba Carlos (2000), en su primer curso de especialización en automática “Control Predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas” El Control Predictivo se desarrollo en base a dos líneas básicas. Por un lado, a finales de los años setenta surgieron diversos algoritmos que usaban explícitamente un modelo dinámico del proceso para predecir el efecto de las acciones de control futuras en la salida, las cuales eran determinadas minimizando el error predicho sujeto a restricciones de operación. La optimización se repetía en cada instante de muestreo con información actualizada del proceso. Estas formulaciones eran de naturaleza heurística y algorítmica e intentaban aprovechar el cre-

ciente potencial de los computadores digitales por aquella época. Rapidamente el MPC adquirió gran popularidad en las industrias de procesos químicos principalmente debido a la simplicidad del algoritmo y al uso del modelo de respuesta impulsional o en escalon, que aunque posea muchos más parámetros que las formulaciones en el espacio de estados o función de transferencia suele ser preferido por ser intuitivo y necesitar menos información a priori para identificar. La mayoría de las aplicaciones fueron llevadas a cabo sobre sistemas multivariados incluyendo restricciones. Los algoritmos utilizados fueron principalmente el IDCOM (Identification-Command) y el DMC (Control con Matriz Dinámica, Dynamic Matrix Control). Independientemente fue surgiendo otra línea de trabajo en torno a las ideas del control adaptativo, desarrollando estrategias esencialmente para procesos monovariados formuladas con modelos entrada/salida. En este contexto se extendieron las ideas del Controlador de Mínima Varianza y se desarrolló el Control Predictivo Generalizado (Generalized Predictive Control GPC) que es uno de los métodos más populares en la actualidad.

2.1.2. Ámbito nacional

Ministerio de Agricultura y Riego - ANA (2010) En el Proyecto “Obras de control y medición de agua por bloques de riego en el valle Cañete”. El aprovechamiento del recurso hídrico en el sector agrícola, demanda una atención especial, debido a que este sector es el que mayor cantidad de agua consume y probablemente es el que con menor eficiencia lo hace; en tal sentido un incremento en la eficiencia de riego, puede traducirse en volúmenes adicionales de agua para atender mayores áreas de cultivo. La infraestructura de riego en la mayor parte de los valles de la costa, está constituida por una red de canales en los cuales se requiere de estructuras de medición de agua, existiendo a la fecha la tendencia a suministrar cantidades mayores a las necesidades medias, originándose pérdidas significativas por percolación profunda y escorrentía su-

perficial; así como por inadecuada operación de las estructuras existentes y los malos hábitos de usos de agua de riego por parte de los agricultores ubicados principalmente en la parte alta y media del valle. A partir del año 1998 la Dirección General de Aguas y Suelos (actualmente Intendencia de Recursos Hídricos) dentro de su política normativa y promotora comenzó con la construcción de estructuras de medición y control de caudales; en el siguiente Cuadro 1 se muestra las metas físicas alcanzadas entre los años 1998 al 2002.

Cuadro 1: Metas físicas alcanzadas durante los años 1998-2006

AÑO	Nº DE MEDIDORES	Nº DE COMPUERTAS
1998	188	6
1999	522	573
2000	518	1548
2001	535	1008
2002	483	336
TOTAL	2246	3471

Fuente: INRENA-IRH.

La ubicación de estos medidores correspondía al requerimiento de cada Junta de Usuarios y al inventario elaborado por las Administraciones Técnicas de los Distritos de Riego (ATDR) correspondientes. De acuerdo a lo apreciado en la mayor parte de valle, muchos medidores no se encuentran operativos, por lo que no es posible registrar correctamente los caudales, presentándose en gran parte de estas estructuras de medición problemas de mantenimiento, rehabilitación y en otros casos problemas de ubicación y funcionamiento debido a consideraciones erradas de diseño. En el mes de marzo del 2004, el INRENA a través de la Intendencia de Recursos Hídricos-IRH y ATDRs y con recursos del Fondo de Reforzamiento Institucional-FRI, se iniciaron las acciones del Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua-PROFODUA correspondientes a la

Fase 1. Que consiste en la adecuación y regularización de los derechos de uso de agua, que contempla la modalidad de Asignación del Agua de Riego por Bloques, en los puntos de abastecimiento de agua (captación del agua de riego en el cauce natural de la fuente hídrica, canal principal o canales laterales, según sea el caso), entendiéndose por “Bloque de Riego o de Asignación“, a la unidad básica de demanda conformada por el conjunto de predios bajo riego, de uso agrícola o unidades agrícolas productivas (con licencia y con permiso, formales, por formalizar y no formalizables) que tienen en común el origen del recurso hídrico, una estructura hidráulica de captación, distribución y/o regulación, entre otros. En un valle, unitariamente, es al bloque, la unidad, a la cual se le ha otorgado un volumen de agua total anual, así como su desagregación mensual, con una garantía en este caso a una persistencia del 75 %, donde los bloques toman como referencia los ámbitos o áreas de las Juntas de Usuarios, Comisiones de Regantes y Comités de Regantes, donde es posible relacionarlos. Este Programa continuó durante los años 2005 y 2006, principalmente en los valles de la costa y en algunos valles principales de la sierra, lográndose formalizar hasta el término del año 2006 un total de 242,045 predios. El Programa continuará desarrollándose durante el 2007. Posteriormente entre los años 2005 y 2006, la Intendencia de Recursos Hídricos teniendo en cuenta la carta de intención firmada por el JBIC para el financiamiento de la fase de inversión, vía PSI; en el cual se manifiesta una contrapartida de las organizaciones beneficiarias equivalente al 20 % del costo total, elaboró 18 estudios definitivos correspondientes a un número similar de Juntas de Usuarios. Mediante Decreto Supremo N° 187-2006-EF de fecha 01 de diciembre del 2006 se aprobó la Operación de Endeudamiento Externo del Gobierno Peruano con el Japan Bank International Cooperation-JBIC que a través del Programa Subsectorial de Irrigaciones-PSI será la Unidad Ejecutora del Programa “Proyecto Subsectorial de Irrigación JBIC PE-P31 y dentro de éste el Sub Componente A 2: Obras de Control y Medición de Agua por Blo-

ques de Riego, cuya ejecución se inició el presente año. El ámbito de acción se encuentra en los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, Ancash, Lima, Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna. En el caso específico del valle de Cañete, como resultado del Diagnóstico realizado por el PROFODUA – IRH del año 2004, se concluyó que la Junta debe tener 34 bloques de riego en las 07 Comisiones de Regantes que conforman la Junta de Usuarios del Sub Distrito de Riego Cañete. En el momento de la evaluación realizado, se ha determinado que se requiere implementar con veinte (20) estructuras de medición, incluyendo tres (03) estructuras de control, algunos bloques de riego están implementados con estructuras de control y medición, los cuales se encuentran operativos y en buen estado de conservación. Siendo de especial importancia la implementación de Estructuras de Control y Medición de Caudales, principalmente en las cabeceras de los Bloques de Riego conformados en las Comisiones de Regantes de la Junta de Usuarios del Sub Distrito de Riego Cañete, lo cual favorecerá la distribución ordenada de los recursos hídricos asignados a estos Bloques de Riego. En tal sentido, el presente estudio de preinversión a nivel de perfil en el marco del SNIP, sustenta la implementación de las estructuras de control y medición en el valle de Cañete.

2.2. Bases teóricas

- **Bases ontológicas.** Debido a que año tras años el recurso hídrico disminuye en el valle de Cañete y no se logra satisfacer a todos los beneficiarios se diseñó un sistema de control para la distribución de agua que permite optimizar el uso del recurso hídrico y así lograr que todos los usuarios sean beneficiados, permitiendo reducir los costos de operación.
- **Bases metodológicas.** La metodología a seguir para el diseño del control predictivo generalizado se fundamenta en las siguientes etapas:

- Modelamiento matemático del canal de riego.
 - Identificación de parámetros del canal de riego.
 - Modelación del control predictivo generalizado.
- **Bases epistemológicas.** Epistemológicamente, la relación entre las señales de entrada y salida; es decir entre las variables dependientes y las independientes se determinan por medio de un modelo matemático del sistema dinámico.

2.2.1. Comportamiento dinámico de un tramo principal

Para el diseño de un controlador, sea de tipo convencional o avanzado, es necesario disponer de un modelo matemático que describa de forma adecuada el comportamiento dinámico más relevante del tramo de canal de riego objeto de estudio [46, 24, 39, 26].

Hay dos formas de abordar la construcción del modelo: obtenerlo mediante ecuaciones que describan la dinámica del proceso (modelado), o mediante experimentación sobre el proceso (identificación de sistemas).

Los canales de riego por definición son conductos para el transporte de agua con una superficie libre expuesta a la atmósfera. El movimiento del agua generalmente se debe a la fuerza de gravedad. Las ecuaciones de balances para modelar matemáticamente los movimientos del agua en canales hidráulicos abiertos fueron derivadas por primera vez por Jean-Claude Barré De Saint Venant en 1871 [26]. Las ecuaciones de Saint-Venant, resultan de la aplicación de balances de masa y de momento, y se representan mediante las expresiones [26]:

$$B \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -2\beta \frac{Q}{A_c} \frac{\delta Q}{\delta x} + \beta \frac{Q^2}{A_c^2} \frac{\delta A_c}{\delta x} - \frac{|Q| Q g n^2}{A_c R^{\frac{4}{3}}} + g \left(I - \frac{\delta Y}{\partial x} \right) A_c \quad (2)$$

donde $B(m)$ es el ancho de la sección transversal, $Y(m)$ es la profundidad, $H(m)$ es el nivel del agua, $Q(m^3/s)$ es el caudal, $q_l(m^2/s)$ es el caudal lateral por unidad de longitud, $t(s)$ es el tiempo, $x(m)$ es la distancia en dirección aguas abajo perpendicular a la gravedad, $Y(m)$ es la profundidad del flujo, $A_c(m^2)$ es el área transversal, β es el coeficiente de corrección de momento, $g(m/s^2)$ es la aceleración de la gravedad, $I(m/m)$ es la pendiente del fondo, $n(s/m^{1/3})$ es el coeficiente de resistencia de Manning, $P(m)$ es el perímetro mojado y $R(m) = A_c/P$, es el radio hidráulico. Las expresiones de Saint-Venant representan ecuaciones no lineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas con restricciones complejas, que no tienen solución analítica. Existen diferentes métodos para resolverlas, principalmente basados en aproximaciones numéricas que conllevan a modelos matemáticos complejos, por lo que su aplicación en la simulación del comportamiento dinámico de un canal de riego requiere un elevado costo computacional y su utilización en forma directa en el diseño de sistemas de control presenta serias dificultades [46, 20, 39]. Surge entonces la necesidad obtener modelos matemáticos simples para canales de riego que posibiliten su aplicación en el diseño de sistemas de control sobre todo los basados en modelo. Para diseñar un sistema de control del nivel de agua en un tramo de un canal de riego no se requiere conocer el comportamiento dinámico de esta variable a lo largo de todo el tramo, es suficiente conocer su variación en un punto específico, en dependencia del método de regulación a utilizar. Esta consideración implica que un modelo aproximado lineal con parámetros concentrados y retardo de tiempo puede caracterizar de forma adecuada el comportamiento dinámico de dicha variable en el punto de medición [32, 38, 39].

Tomando en cuenta lo dicho, las técnicas experimentales de identificación de sistemas constituyen una herramienta importante para resolver esta problemática, ya que posibilita la obtención de modelos matemáticos sobre la base de las mediciones de sus señales de salida y entrada, obtenidas en condiciones de

funcionamiento, teniendo en cuenta que se verán afectadas por ruidos, perturbaciones e incertidumbres.

El uso de modelos obtenidos a través de la identificación de sistemas tiene dos ventajas: los modelos son simples, en tiempo discreto, expresados en ecuaciones en diferencias y dado que son construidos desde datos medidos describen con precisión la dinámica relevante de los sistemas objeto de estudio. Existen diferentes trabajos en los que se ha utilizado exitosamente la identificación de sistemas para la obtención de modelos simples que describan la dinámica de canales principales de riego. El uso de esta clase de modelos en el diseño de sistemas de control no presenta dificultades [46, 37, 14, 14, 38, 3, 39].

2.2.2. Modelo paramétrico.

Los sistemas de control predictivo requieren de modelos paramétricos que permitan relacionar la entrada aplicada con la salida. Sin embargo, los datos experimentales no sólo muestran esta relación, sino también la influencia de las perturbaciones en la salida, por lo que seleccionar adecuadamente la estructura del modelo constituye una de las decisiones más importantes y difíciles en el procedimiento de identificación de sistemas debido a que la complejidad del modelo puede afectar la exactitud con la que describe el proceso real [28]. La selección de la estructura del modelo significa determinar los polinomios que integran el modelo. Los métodos de estimación por mínimos cuadrados, permiten utilizar diferentes estructuras de modelos entre las que se encuentran: ARX (auto-regresión con entrada controlada), ARMAX (auto-regresión de media móvil con entrada controlada) y OE (error de salida) [28].

La estructura OE ofrece una buena descripción de las propiedades de baja frecuencia del sistema, mientras que la estructura ARX posibilita una mejor descripción de las propiedades de alta frecuencia [28]. De particular interés es la estructura ARMAX, ya que permite obtener una función de transferencia de la

parte determinística (relación entrada-salida) y otra de la parte estocástica (relación perturbaciones-salida) del tramo de canal bajo estudio con un proceso de media móvil. Se realizaron trabajos de evaluación en función de estas tres posibles estructuras del modelo del tramo de canal. Estas estructuras se pueden representar mediante las expresiones siguientes [28]:

$$A(q^{-1})\hat{y}_{ARX}(k) = B(q^{-1})q^{-d}u(k) + \xi(k); \quad (3)$$

$$A(q^{-1})\hat{y}_{ARMAX}(k) = B(q^{-1})q^{-d}u(k) + C(q^{-1})\xi(k); \quad (4)$$

$$\hat{y}_{OE}(k) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}q^{-d}u(k) + \xi(k); \quad (5)$$

donde $\hat{y}_{ARX}(k)$, $\hat{y}_{ARMAX}(k)$, $\hat{y}_{OE}(k)$ son las estimaciones del nivel aguas abajo (señales de salida de los modelos) para la compuerta número 36 del canal viejo imperial con estructuras ARX, ARMAX y OE, respectivamente.

Los polinomios $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, $F(q^{-1})$ se encuentran definidos mediante:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (6)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \quad (7)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \quad (8)$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf} \quad (9)$$

Donde n_a , n_b , n_c , n_f son los órdenes de los respectivos polinomios; a_j , b_j , c_j , f_j son los parámetros de las respectivas estructuras de modelo que se necesitan estimar y que conforman el vector de parámetros $\hat{\theta}_j(k)$ del modelo con estructura j ($j = ARX$, $ARMAX$ y OE); $d = \frac{\tau}{T}$ son los períodos de retardo de tiempo del proceso; y $\xi(k)$ (secuencia de ruido blanco de media cero) caracteriza matemáticamente el comportamiento dinámico de las perturbaciones que actúan sobre el

tramo del canal objeto estudio.

El polinomio $C(q^{-1})$ de la estructura ARMAX posibilita cuantificar en el modelo los efectos de las perturbaciones fundamentales que actúan sobre el tramo del canal bajo estudio, las cuales, se encuentran representadas por la descarga lateral $q_{VI}(t)$, así como por las interacciones de los tramos adyacentes aguas arriba y aguas abajo. Ello permite realizar mejores predicciones de la salida del sistema.

La estructura del modelo OE considera que el ruido se añade directamente a la salida del proceso objeto de estudio; mientras que en las estructuras ARX y ARMAX, el ruido se añade en un punto entre la entrada y la salida del proceso objeto de estudio [28]. En la figura 1 se muestran diagramas en bloques de las estructuras de modelo seleccionadas.

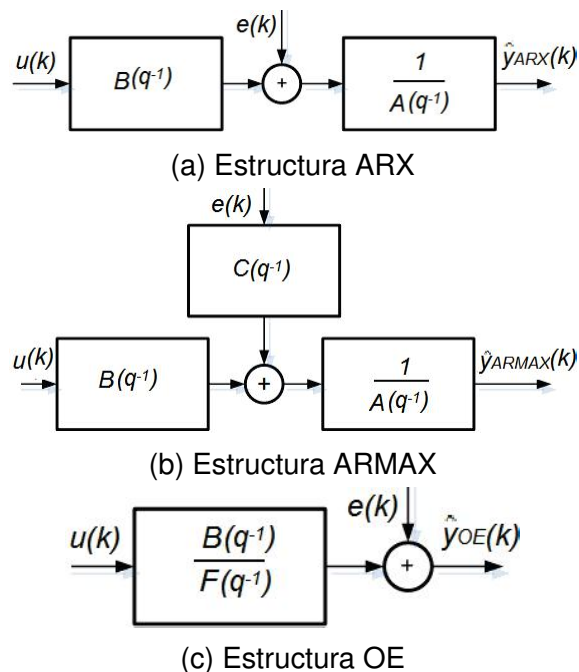


Figura 1: Diagramas en bloques de las estructuras

Fuente: [11]

Resulta importante, determinar el orden de cada polinomio de las estructuras del modelo seleccionado. Un orden bajo puede implicar que el modelo no describa de forma adecuada la dinámica real del proceso, mientras que un orden elevado incorpora más incertidumbres al modelo. Por ello se probaron distintos órdenes de los polinomios. La estructura y el orden del modelo final se determinaron a través del proceso de validación de modelos.

Estimación de los parámetros del modelo.

En el proceso de estimación del modelo es necesario contar con un criterio que exprese la bondad del ajuste del modelo a los datos experimentales, es decir, que exprese la calidad del modelo obtenido. Normalmente, los criterios para los sistemas discretos se expresan en la forma [28, 1, 35, 41]:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^{NE} (g(\epsilon(k))) \quad (10)$$

donde $J(\theta)$ es la función de coste de la estimación, θ es el vector de parámetros que se trata de ajustar, $g(\cdot)$ es la función de ponderación del error usualmente cuadrática, $\epsilon(k)$ es el error de entrada, error de salida o un error generalizado y N_E es el número de observaciones o medidas disponibles para la estimación.

Estimar los parámetros implica resolver un problema de optimización en el cual, el mejor modelo es el que minimiza el criterio. El proceso de ajuste se realiza de manera que se busca el valor del vector de parámetros θ que hace mínimo el criterio de desempeño $J(\theta)$.

En este trabajo se utilizó el método de mínimos cuadrados y una variante de éste, la estimación de probabilidad máxima para realizar el ajuste [28, 41, 35]. El criterio de mínimos cuadrados, el cual minimiza la suma de los cuadrados del error, es bueno para estimar parámetros de sistemas que se pueden modelar mediante estructuras ARX, donde es posible separar el ruido blanco del modelo

determinista, obteniendo regresores lineales. En cambio, para estimar los parámetros de un modelo ARMAX, cuyo regresor es pseudo-lineal, es recomendable utilizar la estimación de máxima probabilidad, debido a que el método de mínimos cuadrados produce una desviación indeseable de los parámetros estimados. Los algoritmos de identificación que utilizan estos criterios se encuentran implementados en MATLAB. Las funciones a utilizar son **ARX**, **ARMAX** y **OE**, en las que se ingresan los datos de entrada-salida y los órdenes tentativos de los polinomios que conforman la estructura de modelo. Las funciones devuelven el modelo paramétrico ajustado [18, 29]. La función **ARX** realiza la estimación de parámetros mediante mínimos cuadrados, utilizando la factorización QR para ecuaciones lineales sobredeterminadas[18, 29]. La función **ARMAX** minimiza un criterio de máxima probabilidad utilizando un algoritmo de búsqueda iterativa. Adicionalmente, el predictor se somete a una prueba de estabilidad, para asegurar que sólo los modelos correspondientes a predictores estables sean estimados [28, 29]. La función **OE** posee un algoritmo similar al de máxima probabilidad pero utiliza métodos ligeramente diferentes para calcular los errores de predicción y los gradientes [29].

Validación de modelo.

La validación de un modelo constituye una etapa esencial en el proceso de identificación en la que se comprueba si el modelo obtenido describe adecuadamente la dinámica del proceso estudiado [28, 18, 41]. La forma de abordar la problemática de la validación de modelo consiste en examinarlo con la mayor cantidad posible de información acerca del proceso real y formar criterios que permitan discernir entre los modelos bajo análisis. La selección final no sólo depende del modelo en sí, sino del propósito de su uso [28]. El proceso de validación puede consistir en la inspección de los gráficos de la respuesta del sistema, sin embargo con el objeto de medir la calidad del proceso de identifica-

ción se dispone de técnicas en base a las cuales se analiza la diferencia entre la salida medida y la salida calculada con el modelo obtenido. Estas diferencias poseen información sobre la calidad del modelo [36]. Para la validación del modelo del tramo de canal de riego objeto de estudio, se analizó la respuesta de las estructuras de modelos propuestos bajo diferentes puntos de vista. Se planteó un grupo de pruebas, y en correspondencia con los resultados obtenidos, se seleccionó el mejor modelo. Para validar los modelos se realizaron los siguientes análisis [28, 18]:

- Prueba del error final de predicción.
- Análisis de polos y ceros.
- Validación cruzada.
- Índices de comportamiento.
- Medidas estadísticas.

En primer lugar se verificó la correcta estimación del orden del modelo. Para ello se realizó un análisis mediante el criterio de Akaike o AIC (Akaike's information criterion) llamado FPE (final prediction error criterion for estimated model). Esta prueba provee una medida de la calidad del modelo a través de simulación y permite determinar el orden del mismo. De acuerdo a la teoría de Akaike, el modelo más adecuado es el que tiene menor valor de FPE [28, 41]. MATLAB utiliza la siguiente función para calcular este valor:

$$FPE(\theta) = J(\theta)\left(1 + \frac{2p}{N_E}\right), \quad (11)$$

donde $J(\theta)$ es la función de coste de la estimación de parámetros, p el número de parámetros estimados del modelo y N_E es el número de muestras del conjunto

de estimación. La función $J(\theta)$ se define mediante:

$$J(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sum_1^N \epsilon(k, \theta_N) (\epsilon(k, \theta_N))^T \right| \quad (12)$$

donde θ_N representa el vector de parámetros estimados.

Este criterio permite buscar la mejor estructura, penalizando la utilización de un número determinado de parámetros. El uso de muchos parámetros no es sinónimo de tener un mejor modelo. Muchas veces se complica excesivamente el modelo sin producir una mejora apreciable en su comportamiento.

2.2.3. Control predictivo

El control predictivo basado en modelo se desarrolló a finales de los setenta y ha tenido un desarrollo considerable desde entonces [6].

El control predictivo integra estrategias tales como: control óptimo, control con retardo de tiempo, modelado, control multivariable, entre otros. Permite la consideración de restricciones y el control de plantas no lineales.

El término control predictivo no designa a una estrategia de control particular sino a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control minimizando una función objetivo [6].

Esta estrategia de control lleva a controladores que tienen básicamente la misma estructura y los mismos elementos:

- Uso explícito de un modelo interno para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo (horizontes).
- Cálculo de la señal de control minimizando cierta función de coste (objetivo).
- Estrategia deslizante, de forma que en cada instante de tiempo el horizonte

se va desplazando hacia el futuro, lo que implica la aplicación de la primera acción de control calculada y la repetición del procedimiento en cada período de control con la nueva información disponible del proceso.

Los distintos algoritmos de control predictivo difieren en el tipo de modelo interno utilizado, así como en para las perturbaciones y función objetivo consideradas. Los algoritmos de control predictivo más comunes son [7]:

Controlador de matriz dinámica (DMC): Este controlador usa la respuesta escalón para modelar el proceso, considerando sólo los N primeros términos, asumiendo por tanto que el proceso es estable. En cuanto a las perturbaciones, se considera que su valor permanece constante e igual al existente en el instante actual durante todo el horizonte. La función objetivo considera los errores futuros y el esfuerzo de control.

Una de las características de este método que lo ha hecho muy popular en la industria es la inclusión de restricciones, que se traduce en inecuaciones de forma genérica. En este caso la optimización debe ser numérica y se lleva a cabo en cada período de muestreo, calculando la señal de control en dichos períodos. Los principales inconvenientes de este método son el tamaño del modelo empleado y la imposibilidad de tratar procesos inestables.

Controlador de modelo algorítmico (MAC): Este controlador se conoce también como modelo de control predictivo heurístico. Es muy similar al DMC con la diferencia principal de usar un modelo de respuesta impulso finito FIR. Introduce el concepto de trayectoria de referencia como un sistema de primer orden que evoluciona desde la salida actual al punto de ajuste según una determinada constante de tiempo. La varianza del error entre esta trayectoria y la salida es lo que marca la minimización de la función objetivo. El método también considera restricciones en los actuadores, en las variables internas o en las salidas secundarias.

Controlador predictivo funcional (PFC): Este controlador fue desarrollado para

procesos rápidos. Emplea un modelo en el espacio de estados, por lo que permite el manejo de procesos inestables, y también la extensión al caso no lineal. Este controlador tiene dos características que lo distinguen del resto de controladores de la familia: el uso de puntos de coincidencia y de funciones base. El concepto de puntos de coincidencia se emplea para simplificar los cálculos considerando sólo un subconjunto de puntos en el horizonte de predicción. La salida deseada y la predicha deben coincidir en dichos puntos, y no en todo el horizonte de predicción. La otra idea de este método es la parametrización de la señal de control como una combinación lineal de ciertas funciones base, que se eligen según la naturaleza del proceso y la referencia, estas funciones son de tipo polinomial: escalones, rampas o parábolas, ya que la mayoría de las referencias se pueden especificar como combinación de estas funciones. Con esta estrategia, un perfil de entrada complejo se puede especificar usando un pequeño número de parámetros desconocidos que son las incógnitas del problema de minimización. El algoritmo PFC también puede manejar restricciones de máximo y mínimo en la aceleración, que son prácticas en aplicaciones de servo control.

Controlador adaptativo de predicción extendida (EPSAC): Este algoritmo usa un modelo de función de transferencia tipo ARIMAX (auto-regresivo de media móvil con entrada controlada con integrador). La estructura de la ley de control es muy simple, ya que considera que la señal de control permanecerá constante a partir del instante k (es decir, horizonte de control igual a 1).

Controlador adaptativo de horizonte extendido (EHAC): Esta formulación también emplea un modelo de función de transferencia y pretende minimizar la diferencia entre la salida calculada y la referencia en el instante $k + N$. La solución a este problema no es única a menos que N sea mayor o igual al tiempo muerto. Una posible estrategia consiste en considerar horizonte de control igual a 1 o minimizar el esfuerzo de control. La ley de control depende sólo de los parámetros del proceso y pueden hacerse fácilmente adaptativa si se emplea un identificador

en línea. El único coeficiente de ajuste es el horizonte de predicción N , lo cual simplifica su uso, pero proporciona poca libertad para el diseño.

Control predictivo generalizado (GPC): Este método propuesto por [8] emplea un modelo ARIMAX (auto-regresivo de media móvil con entrada controlada con integrador) para la predicción de la salida y la perturbación viene dada por un ruido blanco coloreado. La predicción óptima se lleva a cabo resolviendo una ecuación diofántica, lo cual puede hacerse eficazmente de forma recursiva. Este algoritmo, al igual que otros que usan el modelo de función de transferencia, se pueden implementar fácilmente en forma adaptativa usando un algoritmo de identificación en línea como los mínimos cuadrados recursivos. El GPC utiliza una función objetivo de tipo cuadrática teniendo en cuenta el error y el esfuerzo de control, además de factores de ponderación para ambos términos que pueden ser constantes o variables en el tiempo. La técnica de control predictivo parece constituir una herramienta muy útil y cuenta éxitos en el ámbito industrial [30]. Esto se debe principalmente a:

- Resulta particularmente atractivo para personal sin un conocimiento profundo de control, puesto que los conceptos resultan muy intuitivos, a la vez que la sintonización es relativamente fácil, aún en lazos de control que presentan cierto grado de dificultad de sintonización debido a retardos de tiempo;
- Puede ser usado para controlar una gran variedad de procesos, desde aquellos con dinámica relativamente fácil hasta otros más complejos incluyendo sistemas con grandes retardos, inestables o de fase no mínima;
- Puede tratar con facilidad el caso multivariable;
- Posee intrínsecamente compensación de retardo;
- Introduce de forma natural control feedforward para compensación de per-

turbaciones medibles;

- Las restricciones en las señales de control, debido a los actuadores así como las restricciones en los estados del proceso son fáciles de incorporar al algoritmo de control;
- Es muy útil cuando se conocen las referencias futuras;
- Es una metodología completamente abierta basada en algunos principios básicos que permiten extensiones futuras.

Indiscutiblemente, este método también presenta inconvenientes. A pesar de que la implementación del controlador no es difícil, es más compleja que la de un controlador PID. El controlador resultante será simple si la dinámica del proceso no cambia y no hay restricciones, de lo contrario la carga de cálculo que implica la resolución de determinados algoritmos provoca que la respuesta dependa de la potencia del computador que se utilice. El mayor inconveniente que existe, es que este método de control precisa de un modelo interno adecuado del proceso, que debe ser lo más cercano posible al real, porque las prestaciones obtenidas dependerán de las diferencias entre la planta real y el modelo usado. EL controlador predictivo ha demostrado ser en la práctica una estrategia razonable de control y ha sido aplicado con éxito a numerosos procesos industriales.

Caracterización de los controladores predictivos basados en modelo.

Todos los controladores predictivos tienen características comunes las cuales se detallan a continuación:

- i. En cada instante k , haciendo uso del modelo interno del proceso, se predicen las salidas futuras en la planta para un determinado horizonte de predicción N . Estas salidas predichas, $\hat{y}(k+j|k)$ para $j = 1 \dots N$ dependen de las entradas y salidas pasadas, cuyos valores son conocidos, y de las señales de

control futuras $u(k+j|k), j = 0 \dots N$ que son las que se calculan y envían a la planta (ver 2)

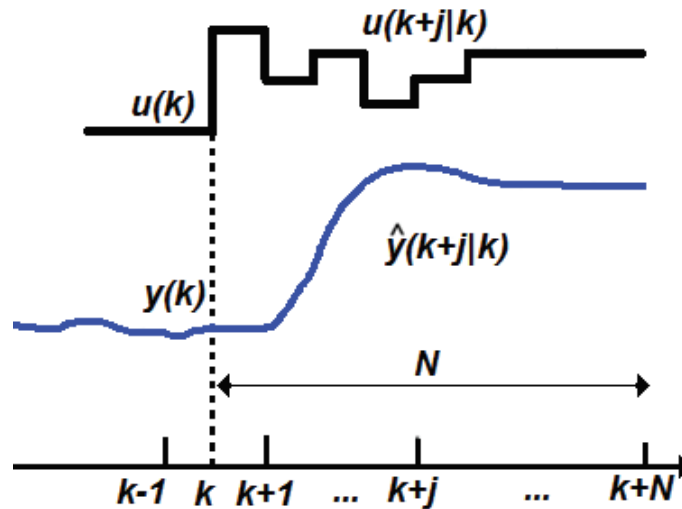


Figura 2: Diagrama de señales del control predictivo basado en modelo.

Fuente: [11]

- II. Las señales de control futuras se calculan en función de la optimización de cierto criterio que trata de mantener el proceso, lo más próximo posible a la trayectoria de referencia $w(k+j)$. Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia también predicha, incluyendo en muchos casos el esfuerzo de control. Adicionalmente se hace alguna suposición sobre la estructura de la ley de control futura, como por ejemplo que va a ser constante a partir de cierto instante.
- III. La señal de control $u(k/k)$ es enviada al proceso, mientras que las demás señales de la secuencia de control se desechan. Puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conoce $y(k+1)$, se calcula la secuencia actualizada y se obtiene $u(k+1/k+1)$, haciendo uso del concepto de horizonte móvil.

La estructura básica de un controlador predictivo basado en modelo (CPBM) se presenta en la figura 3. Las señales de salidas predichas las obtiene el modelo a partir de las señales de control futuras y de las señales de entradas y salidas pasadas, de aquí la importancia de que el modelo capture adecuadamente la dinámica del proceso. Las señales de control se obtienen considerando una función de coste y determinadas restricciones, las mismas son calculadas por el optimizador.

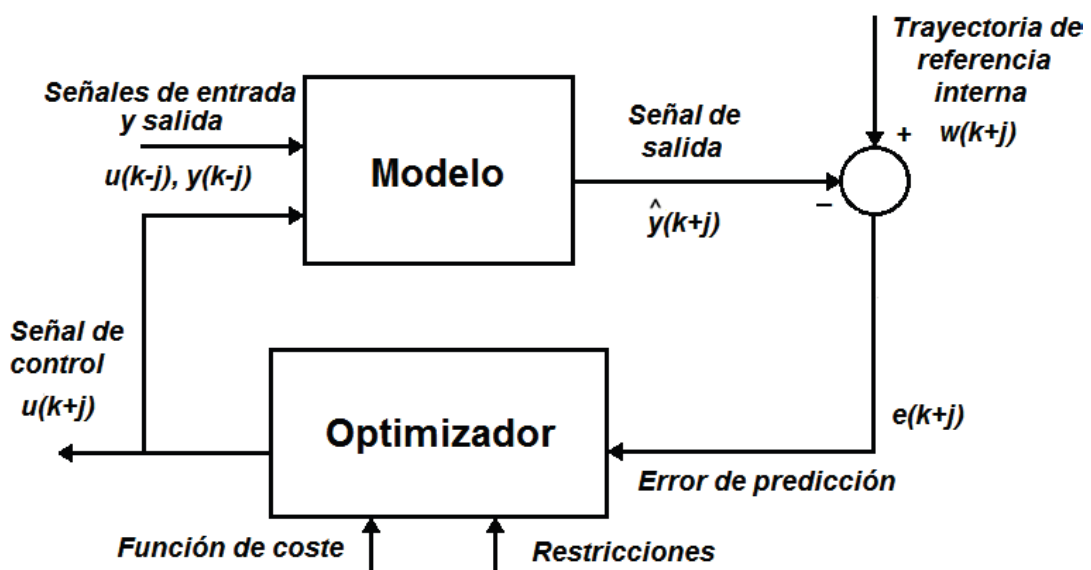


Figura 3: Estructura del control predictivo basado en modelos.

Fuente: [11]

Si la función de coste es cuadrática, el modelo es lineal y no existen restricciones, se puede obtener una solución explícita. Si éste no es el caso se ha de acudir a un algoritmo numérico de optimización que requiere mayor capacidad de cálculo [6].

Elementos del control predictivo basado en modelo.

Todos los algoritmos del control predictivo basado en modelo poseen elementos comunes y para cada uno de estos elementos se pueden elegir diversas

opciones. Estos elementos son:

- Utilizan un modelo interno de predicción;
- Disponen de una función de coste (objetivo);
- Presentan una señal de referencia interna.
- Obtienen la señal de control resolviendo un problema de optimización.

Modelo de predicción.

Para el buen funcionamiento del controlador CPBM se requiere de un buen modelo interno del proceso, por lo que es imperativo obtener un modelo matemático que represente con suficiente exactitud el comportamiento dinámico de la planta y permita un buen análisis teórico. Las diferentes estrategias del control predictivo utilizan distintos modelos para representar la dinámica de la planta. Estos modelos pueden ser lineales o no lineales, en tiempo continuo o en tiempo discreto, pueden estar expresados en función de transferencia o en ecuaciones de estado, pueden ser multivariantes o monovariantes. El modelo tiene en cuenta también las perturbaciones, para describir el comportamiento dinámico del ruido, de los errores de modelado, entre otros. El modelo interno del CPBM cuenta con dos partes: el modelo del proceso y el modelo de las perturbaciones. Cualquier CPBM método usa ambas partes para la predicción.

Modelo del proceso.

Casi todas las formas posibles de modelado de procesos aparecen en alguna formulación de los CPBM siendo las más usadas las siguientes:

- **Respuesta impulso.** Los valores de salida de la planta se obtienen de una entrada de tipo impulso. La salida en función de la entrada se expresa en

la forma:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(k-i) \quad (13)$$

donde h_i son los valores muestreados de la señal de salida cuando el proceso es excitado con un impulso unitario (ver Figura 3.4). La predicción viene dada por:

$$\hat{y}(k+j|k) = \sum_{i=1}^N h_i u(k+j-i|k) = H(q^{-1})u(k+j|k) \quad (14)$$

Una ventaja de este método es que no requiere información previa sobre el proceso, con lo que el procedimiento de identificación se simplifica, a la vez que permite describir fácilmente dinámicas complejas como fase no mínima o retardos. Un inconveniente de este modelo es que precisa de varios parámetros, pero en la práctica se utiliza mucho debido a que no requiere de información previa del proceso y facilita la descripción de dinámicas complejas, aunque éstas deben ser estables y sin integradores.

- **Respuesta escalón.** Usado por el DMC y sus variantes, es muy similar al anterior sólo que ahora la señal de entrada es un escalón. La señal de salida de la planta se representa en la forma:

$$y(k) = y_o + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(k-i) = y_o + G(q^{-1})(1-q^{-1})u(k) \quad (15)$$

donde g_i son los valores muestreados de la señal de salida, $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, (ver figura 5). El valor de y_o puede tomarse nulo, sin pérdida de generalidad, con lo cual el predictor es:

$$\hat{y}(k+j|k) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(k+j-i|k) \quad (16)$$

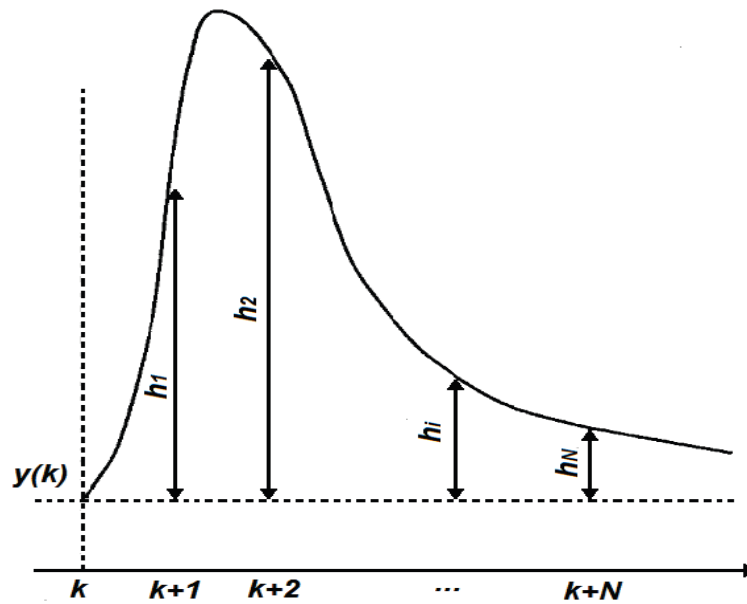


Figura 4: Respuesta al impulso.
Fuente: [11]

Este método presenta las mismas ventajas e inconvenientes que el anterior.

- **Función de transferencia.** Usado por los controladores GPC, UPC, EP-SAC, EHAC, entre otros. La salida viene dada por:

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) \quad (17)$$

La predicción se representa como:

$$\hat{y}(k+j|k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}u(k+j|k) \quad (18)$$

Esta representación es válida también para procesos inestables y posee la ventaja de necesitar pocos parámetros, aunque es fundamental un conocimiento a priori del proceso, sobre todo en cuanto al orden de los polinomios $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$.

- **Espacio de estados.** Usado, por ejemplo, por el FPC. La representación

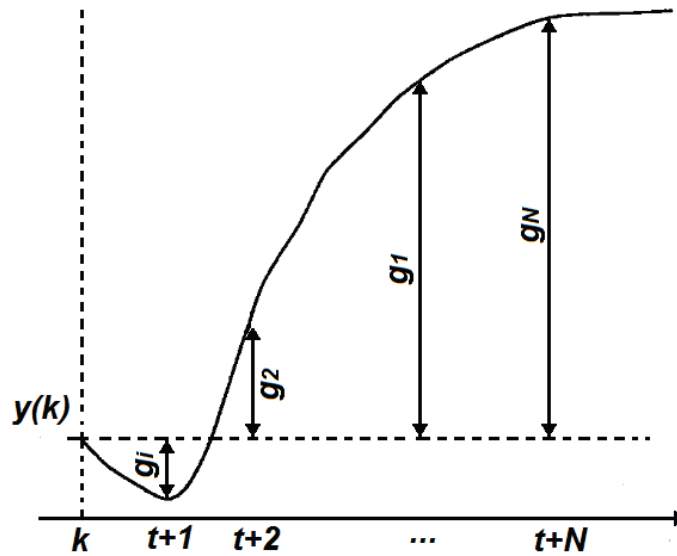


Figura 5: Respuesta al escalón.
Fuente: [11]

de la salida es:

$$\begin{aligned} x(k) &= Ax(k-1) + Bu(k-1) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (19)$$

donde $x(k)$ es el vector de estado, A , B y C son matrices de dimensiones correspondientes, $y(k)$ es el vector de salida. La predicción viene dada por:

$$\hat{y}(k+j|k) = C\hat{x}(k+j|k) = C \left[A^j x(k) + \sum_{i=1}^j A^{j-i} Bu(k+i-1|k) \right] \quad (20)$$

Posee la ventaja de que describe la dinámica de plantas multivariables; a la vez que permita analizar la estructura interna del proceso. Los cálculos pueden ser complicados, y necesitan incluir un observador si los estados no son accesibles.

- **Otros modelos.** También existen modelos no lineales para representar el proceso aunque el problema de su uso radica en que dan lugar a que el

problema de optimización sea más complejo. Otras formas de representación son las redes neuronales y la lógica borrosa, que han sido utilizadas en diferentes aplicaciones.

Modelo de perturbaciones.

Un modelo bastante extendido es el auto-regresivo integrado de media móvil (ARIMA), en el que las perturbaciones, vienen dadas por:

$$n(k) = \frac{C(q^{-1})\xi(k)}{D(q^{-1})} \quad (21)$$

donde $D(q^{-1})$ incluye explícitamente un integrador $\Delta = 1 - q^{-1}$, $\xi(k)$ es un ruido blanco y normalmente $C(q^{-1})$ se toma igual a 1. Se considera adecuado usar este modelo para cambios aleatorios ocurridos en momentos aleatorios. Como caso particular del modelo ARIMA se puede considerar la perturbación constante:

$$n(k) = \frac{\xi(k)}{1 - q^{-1}} \quad (22)$$

cuya mejor predicción es $\hat{n}(k + j|k) = n(k)$

Función de coste (objetivo).

Los diversos CPBM utilizan distintas funciones de coste para la obtención de la ley de control. En general, se persigue que la salida futura en el horizonte de predicción considerado siga a una determinada señal de referencia, al mismo tiempo que se puede penalizar el esfuerzo de control requerido para hacerlo. La expresión general de tal función de coste es:

$$J(N_1, N_2, N_u) = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [y(k + j|k) - w(k + j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k + j - 1)]^2 \right\} \quad (23)$$

Donde N_1 , N_2 son los valores mínimo y máximo del horizonte de predicción, N_u es el horizonte de control, $\delta(j)$, $\lambda(j)$ son coeficientes que ponderan el comportamiento futuro de la planta, usualmente se consideran valores constantes o secuencias exponenciales, (todos estos parámetros son usados en el ajuste del controlador), $w(k+j)$ es la trayectoria de referencia interna, la cual se conoce con anterioridad, con lo que se evitan los efectos de retardo en la respuesta del proceso.

En algunos métodos el segundo sumando de (23), que considera el esfuerzo de control, no es tomado en cuenta, mientras que en otros también aparecen directamente los valores de la señal de control y no sus incrementos. En (23), la trayectoria de referencia interna realiza una aproximación suave desde el valor actual de salida $y(k)$ hacia la referencia externa $r(k+j)$, mediante:

$$w(k) = y(k) \quad (24)$$

$$w(k+j) = \alpha w(k+k-1) + (1-\alpha)r(k+j); j = 1 \dots N \quad (25)$$

donde α es un coeficiente que toma valor entre 0 y 1 y que constituye parámetro ajustable que influye en la respuesta dinámica del sistema. Para valores pequeños de α se tiene una respuesta rápida w_1 , mientras que la respuesta es más lenta w_2 , si α aumenta, tal como se muestra en la figura 6

Restricciones.

En la práctica, todos los procesos están sujetos a restricciones, como por ejemplo: razones constructivas, rangos de seguridad, limitaciones medioambientales, económicas, entre otras. Todo lo expuesto anteriormente hace necesaria la introducción de restricciones en la función de coste a minimizar. El CPBM ge-

neralmente toma en cuenta las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned}
 u_{min} &\leq u(k) \leq u_{max}; \forall k \\
 \Delta u_{min} &\leq u(k) - u(k-1) \leq \Delta u_{max}; \forall k \\
 y_{min} &\leq y(k) \leq y_{max}; \forall k
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Ley de control.

Para obtener los valores de $u(k+j|k)$ se requiere minimizar la función de coste. Para ello se calculan los valores de las salidas predichas $\hat{y}(k+j|k)$ en función de los valores pasados de entradas y salidas, y de señales de control futuras, haciendo uso del modelo interno de predicción y luego se sustituyen estos valores en la función de coste. La minimización de esta función conduce a las señales de control requeridas. Existen configuraciones de la ley de control, una de ellas es la que hace uso del concepto de horizonte de control (N_u), usado en DMC, GPC, EPSAC ó EHAC, la cual produce una mejora en la robustez del sistema y consiste en que tras un cierto intervalo $N_u < N_2$ la señal de control permanece constante, es decir:

$$\Delta u(k+j-1) = 0; j > N_u
 \tag{27}$$

Controlador predictivo generalizado (GPC).

El controlador predictivo generalizado (GPC) fue propuesto por [8] y se ha convertido en uno de los controladores más populares en el ámbito del control predictivo, tanto en el sector industrial como académico, debido a que presenta cierto grado de robustez respecto a sobreparametrización o retardos mal condicionados. Puede utilizar algunas variables de diseño, tiene la capacidad de

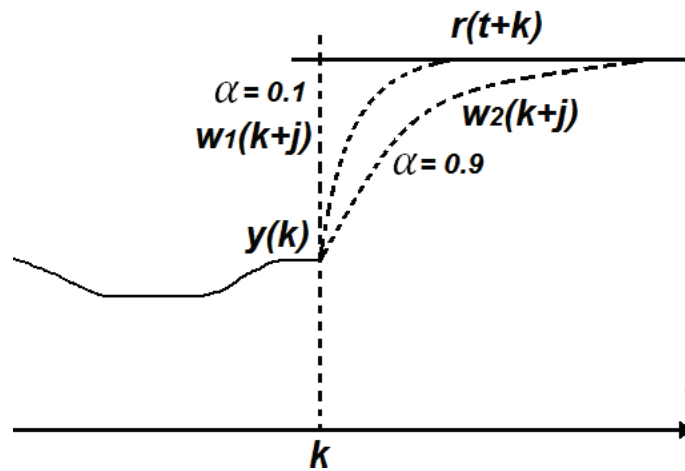


Figura 6: Trayectorias de referencia interna.
Fuente: [11]

brindar soluciones analíticas cuando no se toman en cuenta las restricciones, además de trabajar en procesos inestables y de fase no mínima. Incorpora el concepto de horizonte móvil de control así como la consideración en la función de coste de ponderación de los incrementos en las acciones de control. La idea básica del GPC [7, 41], es calcular una secuencia de futuras acciones de control de tal forma que minimice una función de coste multipaso. El índice a minimizar es la esperanza matemática de una función cuadrática que mide por un lado la distancia entre la salida predicha del sistema y una cierta trayectoria de referencia hasta el horizonte de predicción, y por otro el esfuerzo de control necesario para obtener dicha salida. La sencillez en la aplicación y en la operación hace que el GPC sea una metodología práctica. Su formulación matemática es relativamente sencilla, lo que con lleva a un menor tiempo de cálculo, aspecto muy importante en los sistemas de control en tiempo real. Presenta un número reducido y significativo de parámetros de diseño lo que ayuda durante el arranque y posterior mantenimiento del sistema de control.

Formulación del controlador predictivo generalizado.

El GPC considera un modelo discreto de la planta con estructura ARMAX, el cual está descrito por:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})\xi(k) \quad (28)$$

donde $u(k)$ es la señal de control, $y(k)$ es señal de salida del proceso, $\xi(k)$ es un ruido blanco de media cero, $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ y $C(q^{-1})$ son polinomios en el operador de desplazamiento hacia atrás q^{-1} y d son los períodos de retardo de tiempo de la planta. En la práctica las perturbaciones no son estacionarias, por lo que el GPC hace uso de un modelo ARIMAX representado por:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})\frac{\xi(k)}{\Delta} \quad (29)$$

donde $\Delta = 1 - q^{-1}$.

Este modelo es muy apropiado para muchas aplicaciones industriales, en las que las perturbaciones no son estacionarias [8]. El polinomio $C(q^{-1})$ se toma igual a 1. La función de coste o función objetivo a minimizar para obtener la secuencia de control necesaria, y lograr que la salida del proceso siga a la trayectoria de referencia interna, es:

$$J(N_1, N_2, N_u) = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2 \right\} \quad (30)$$

donde E . es el valor esperado (la esperanza matemática o valor más deseado), generalmente $\delta(j)$ es igual a 1 y $\lambda(j)$ es constante. Uno de los parámetros de ajuste del GPC es el factor de ponderación de la señal de control $\lambda(j)$.

Predicción óptima.

El objetivo es el cálculo de la secuencia de control futura $u(k), u(k+1), \dots$, de tal manera que la salida futura del proceso $y(k+j)$ permanezca próxima a $w(k+j)$. Esto se logra minimizando J . Para conseguir la predicción óptima para $j \geq N_1$ y $j \leq N_2$ es necesario resolver una ecuación diofántica, haciendo uso de un algoritmo recursivo. Considérese la siguiente ecuación diofántica:

$$\begin{aligned} 1 &= E_j(q^{-1})\Delta A + q^{-j}F_j(q^{-1}) \\ 1 &= E_j(q^{-1})\hat{A} + q^{-j}F_j(q^{-1}) \end{aligned} \quad (31)$$

Si se multiplica (29) por $E_j(q^{-1})q^j$ y se toma en cuenta $C(q^{-1}) = 1$ y $x(k+a) \Leftrightarrow q^a x(q)$ se obtiene:

$$\hat{A}(q^{-1})E_j(q^{-1})y(k+j) = E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(k+j-d-1) + E_j(q^{-1})\xi(k+j) \quad (32)$$

Reemplazando (32) en (31) se tiene:

$$(1 - q^{-j}F(q^{-1}))y(k+j) = E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(k+j-d-1) + E_j(q^{-1})\xi(k+j) \quad (33)$$

Reordenando se puede escribir (33) en la forma:

$$y(k+j) = F(q^{-1})y(k) + E_j(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(k+j-d-1) + E_j(q^{-1})\xi(k+j) \quad (34)$$

Al observar esta ecuación se puede notar que el término del ruido se encuentra en el futuro, entonces la predicción óptima es:

$$\hat{y}(k+j|k) = G_j(q^{-1})\Delta u(k+j-d-1) + F(q^{-1})y(k) \quad (35)$$

donde $G_j(q^{-1}) = E_j(q^{-1})B(q^{-1})$.

$$\frac{1}{\widehat{A}(q^{-1})} = \frac{1}{\Delta A(q^{-1})} = \underset{\text{Cuociente}}{E_j} + \underset{\text{resto}}{\frac{F_j}{\Delta A}q^{-j}} \quad (36)$$

Es posible obtener estos polinomios recursivamente, es decir que los nuevos valores en el paso $j + 1$ (E_{j+1}, F_{j+1}) sean función de los del paso j (E_j, F_j), teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} F_j(q^{-1}) &= f_{j,0} + f_{j,1}q^{-1} + \dots + f_{j,na}q^{-na} \\ E_j(q^{-1}) &= e_{j,0} + e_{j,1}q^{-1} + \dots + e_{j,j-1}q^{-(j-1)} \end{aligned} \quad (37)$$

La forma de obtener estos polinomios es:

1. Hallar los primeros polinomios:

$$E_1 = 1, F_1 = q(1 - \widehat{a})$$

2. Añadir los nuevos términos a E_j :

$$E_{j+1}(q^{-1}) = E_j(q^{-1}) + e_{j+1,j}q^{-1} \text{ donde } e_{j+1,j} = f_{j,0}$$

3. Calcular los nuevos términos de F_j :

$$f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - f_{j,0}\widehat{a}_{i+1} \text{ donde } i = 0, 1, \dots, na \text{ siendo } f_{j,na+1} = 0$$

4. Obtener los términos del polinomio G_j :

$$G_{j+1}(q^{-1}) = E_{j+1}(q^{-1})B(q^{-1})$$

Se deben definir correctamente los valores de N_1, N_2, N_u , debido a que si el proceso tiene un retardo de tiempo τ , la salida sólo se verá influenciada por la señal $u(k)$ después del instante $N_1 > d + 1$, los horizontes deben estar definidos mediante:

$$N_1 = d + 1, N_2 = d + N, N_u = N \quad (38)$$

Obsérvese que no tiene sentido hacer $N_1 < d + 1$ que los términos que se añadirán a J sólo dependerán de acciones de control pasadas. Por otro lado, si $N_1 > d + 1$ los primeros puntos de predicción no se tendrán en cuenta.

Considerando el siguiente conjunto de predicciones de j pasos:

$$\begin{aligned}
 \hat{y}(k + d + 1|k) &= G_{d+1}\Delta u(k) + F_{d+1}y(k) \\
 \hat{y}(k + d + 2|k) &= G_{d+2}\Delta u(k + 1) + F_{d+2}y(k) \\
 \hat{y}(k + d + 3|k) &= G_{d+3}\Delta u(k + 2) + F_{d+3}y(k) \\
 &\vdots \\
 \hat{y}(k + d + N|k) &= G_{d+N}\Delta u(k + N - 1) + F_{d+N}y(k)
 \end{aligned} \tag{39}$$

El cual se puede escribir en forma matricial mediante:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{F}(q^{-1}) + \mathbf{G}'(q^{-1})\Delta u(k - 1) \tag{40}$$

donde:

$$\hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t + d + 1|t) \\ \hat{y}(t + d + 2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t + d + N|t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \vdots \\ \Delta u(t + N - 1) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_0 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}'(q^{-1}) = \begin{bmatrix} G_{d+1}(q^{-1}) - g_0 \\ G_{d+2}(q^{-1}) - g_0 - g_1q^{-1} \\ \vdots \\ G_{d+N}(q^{-1}) - g_0 - g_1q^{-1} - \cdots - g_{N-1}q^{-(N-1)} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}(q^{-1}) = \begin{bmatrix} F_{d+1}(q^{-1}) \\ F_{d+2}(q^{-1}) \\ \vdots \\ F_{d+N}(q^{-1}) \end{bmatrix}$$

Como los últimos términos de (40) dependen del pasado forman parte de la respuesta libre del sistema f , como resultado se obtiene la respuesta libre y la

respuesta forzada:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + f \quad (41)$$

donde $f = \mathbf{G}'(q^{-1})\Delta\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{F}(q^{-1})y(k)$ Si las condiciones iniciales son nulas, la respuesta libre también lo es. Si se aplica un escalón unitario a la entrada en el instante k , es decir:

$$\Delta u(k) = 1, \quad \Delta u(k+1) = 0, \dots, \Delta u(k-N-1) = 0 \quad (42)$$

La secuencia de salida $[\hat{y}(k+1) \quad \hat{y}(k+2) \quad \dots \quad \hat{y}(k+N)]^T$ es igual a la primera columna de la matriz \mathbf{G} . Es decir, la primera columna de G se puede calcular como la respuesta de la planta cuando se aplica un escalón unitario. La respuesta libre se puede calcular de forma recursiva a partir de [17]

$$f_{j+1} = q \left(1 - \hat{A}(q^{-1}) \right) f_j + B(q^{-1})\Delta u(k-d+j) \quad (43)$$

con $f_0 = y(k)$ y $\Delta u(k+j) = 0$ para $j \geq 0$

Consideración de ruidos coloreados.

Cuando el polinomio del ruido $C(q^{-1})$ no es igual a 1 la predicción cambia ligeramente. Para calcular el predictor se debe resolver la siguiente ecuación diofántica:

$$C(q^{-1}) = E_j A(q^{-1})\Delta + q^{-j} F_j(q^{-1}) \quad (44)$$

Donde los polinomios E_j y F_j tienen grados $j+1$ y na respectivamente. La ecuación (44) puede ser calculada recursivamente para los diferentes valores de j .

Si se multiplica (31) por $q^j E_j(q^{-1})$, considerando $x(k+a) \Leftrightarrow q^a x(k)$ y representando los polinomios sin su argumento para simplificar la notación, se tiene:

$$Ay(k)q^j E_j \Delta = Bu(k-1)q^{-d} q^j E_j \Delta + \frac{C\xi(k)q^j E_j \Delta}{\Delta} \quad (45)$$

$$E_j A \Delta y(k+j) = B \Delta u(k+j-d-1) E_j + C E_j \xi(k+j) \quad (46)$$

A partir de la ecuación diofántica (44):

$$(C - q^{-j} F_j) y(k+j) = B \Delta u(k+j-d-1) E_j + C E_j \xi(k+j) \quad (47)$$

$$C y(k+j) - q^{-j} F_j y(k+j) = B \Delta u(k+j-d-1) E_j + C E_j \xi(k+j) \quad (48)$$

$$C y(k+j) = B \Delta u(k+j-d-1) E_j + F_j y(k) + C E_j \xi(k+j) \quad (49)$$

Como $\xi(k+j)$ es desconocido en el instante k y puesto que $\xi(k)$ se asume como ruido blanco de media cero, si se considera el valor medio de la expresión (49), se llega a la mejor predicción de la salida para el instante $k+j$ desde el instante k , es decir:

$$y(k+j) = \frac{E_j B}{C} \Delta u(k+j-d-1) + \frac{F_j}{C} y(k) \quad (50)$$

Haciendo $u^f(k) = \frac{u(k)}{C(q^{-1})}$ y $y^f = \frac{y(k)}{C(q^{-1})}$ [7] (50) se representa como:

$$y(k+j) = E_j B \Delta u^f(k+j-d-1) + F_j y^f(k) \quad (51)$$

Definiendo una nueva ecuación diofántica, la cual puede calcularse recursivamente:

$$E_j (q^{-1}) B (q^{-1}) = G_j (q^{-1}) C (q^{-1}) + q^{-j} G'_j (q^{-1}) \quad (52)$$

donde los polinomios G_j y G'_j tienen grados $j-1$ y $\max(nc-1, nb)$ respectivamente. Sustituyendo (52) en (51) y considerando $x(k+a) \longleftrightarrow q^a x(k)$, la predicción óptima viene dada por:

$$y(k+j) = [C G_j + q^{-j} G'_j] \Delta u^f(k+j-d-1) + F_j y^f(k) \quad (53)$$

$$y(k+j) = C G_j \Delta u^f(k+j-d-1) + q^{-j} G'_j \Delta u^f(k+j-d-1) + F_j y^f(k) \quad (54)$$

$$y(k+j) = G_j \Delta u(k+j-d-1) + G'_j \Delta u^f(k-d-1) + F_j y^f(k) \quad (55)$$

La expresión (55) se puede representar de la forma:

$$\hat{y}(k+d+j) = G_j \Delta u(k+j-1) + G'_j \Delta u^f(k-1) + F_j y^f(k+d) \quad (56)$$

La expresión (56) en forma matricial se representa como:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{G}'\Delta u^f(k-1) + \mathbf{F}y^f(k+d) \quad (57)$$

Como los últimos términos de (57) dependen del pasado forman parte de la respuesta libre del sistema, por lo que se puede agrupar en f , por lo que la predicción se representa en forma de respuesta libre y respuesta forzada:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + f \quad (58)$$

donde $f = \frac{\mathbf{G}'(q^{-1})}{C(q^{-1})} \Delta u(k-1) + \frac{\mathbf{F}(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(k+d)$

Obtención de la ley de control.

Calculados los valores de las salidas predichas, tomando en cuenta las entradas y salidas pasadas y las señales de control futuras, es posible minimizar la función de coste a lo largo del horizonte de predicción, para conseguir la señal de control óptima. La función de coste enunciada (30) se puede escribir como:

$$J = (\mathbf{G}\mathbf{u} + f - w)^T (\mathbf{G}\mathbf{u} + f - w) + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \quad (59)$$

donde $\mathbf{w} = [w(k+d+1) \quad w(k+d+2) \quad \dots \quad w(k+d+N)]^T$

Si se tiene:

$$H = 2(G^T G + \lambda I) \quad (60)$$

$$b = 2(f - w)^T G \quad (61)$$

$$f_0 = (f - w)^T (f - w) \quad (62)$$

Al remplazar las ecuaciones (60), (61) y (62) en (59) se tiene:

$$J = \frac{1}{2} u^T H u + b u + f_0 \quad (63)$$

Si no existen restricciones, la minimización de la función de coste se puede lograr de forma analítica, igualando a cero el gradiente J :

$$\frac{\partial J}{\partial u} = 0 \quad (64)$$

Como resultado se obtiene:

$$u = -H^{-1} b^T = 2H^{-1} G^T (w - f) \quad (65)$$

Debido a la estrategia de horizonte móvil la cual consiste en que del vector de acciones de control $u(k)$, sólo se aplica el primer elemento $\Delta u(k)$. En el siguiente instante de muestreo, y aprovechando la nueva información, se calcula un nuevo vector de acciones de control y se vuelve a aplicar nuevamente sólo el primer elemento, y así sucesivamente. Como resultado se obtiene:

$$\Delta u(k) = 2 \begin{bmatrix} 1 & 0_{1 \times (N-1)} \end{bmatrix} H^{-1} G^T (w - f) \quad (66)$$

Finalmente, la señal de control en el tiempo t , se calcula mediante:

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k) \quad (67)$$

Síntesis del sistema de control predictivo.

En este epígrafe se diseña el controlador predictivo generalizado para el canal viejo imperial. El objetivo del control consiste en obtener los valores de salida deseados de nivel de agua aguas abajo del tramo. La estructura del modelo matemático del proceso identificado es:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})\xi(k) \quad (68)$$

Como se precisó anteriormente, el predictor tiene la forma:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}(q^{-1})\mathbf{u} + \mathbf{G}'\Delta u^f(k-1) + \mathbf{F}y^f(k+d) \quad (69)$$

Para elaborar el algoritmo de control es necesaria la solución de las ecuaciones diofánticas (44) y (52) con lo que se obtiene en primer lugar los polinomios $E(q^{-1})$ y $F(q^{-1})$, a partir de los cuales se determinan $G(q^{-1})$ y $G'(q^{-1})$. Con estos resultados se calcula la ley de control directamente. Los parámetros de ajuste del controlador vienen dados por la elección de $N_1, N_2, N_u, \delta(j)$ y $\lambda(j)$.

Solución de las ecuaciones diofánticas.

Se tiene la ecuación diofántica (44):

$$C(q^{-1}) = E_j(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1})$$

La solución recursiva utiliza la solución de la ecuación anterior en j , para obtener la solución en $j+1$. La solución recursiva se expresa mediante las expresiones [40]:

$$E_{j+1} = E_j + e_{j+1,j}q^{-j} \quad (70)$$

$$e_{j+1,j} = \frac{f_{j,0}}{\widehat{A}(0)} \quad (71)$$

$$f_{j+1,i} = f_{j,i+1} - \hat{a}_{i+1}f_{j,0} \quad (72)$$

donde $\hat{A}(0) = 1$. Para empezar las iteraciones E_1 y F_1 se definen mediante [40]:

$$E_1 = C(0) = 1 \quad (73)$$

$$F_1 = q \left(C(q^{-1}) - \hat{A}(q^{-1})C(0) \right) \quad (74)$$

Una vez determinado E_j y F_j , se pueden obtener G_j y G'_j a partir de la ecuación diofántica (44):

$$E_j(q^{-1})B(q^{-1}) = G_j(q^{-1})C(q^{-1}) + q^{-j}G'_j(q^{-1})$$

Como la ecuación diofántica (52) tiene la forma general $c = ax + by$, su solución puede realizarse mediante la función `deconv(c, a)` de Matlab (deconvolución), la cual determina directamente el valor de x, y . Para ello se elige: $c = E_j(q^{-1})B(q^{-1}), x = G_j(q^{-1}), a = C(q^{-1}), by = q^{-j}G'_j(q^{-1})$.

La ecuación (44) se resuelve recursivamente desde $j = N_1 + 1$ hasta $j = N_2$, mientras que la ecuación (52) se resuelve recursivamente desde $j = N_1$ hasta $j = N_2$. A partir de los resultados obtenidos en cada paso j , se forman las matrices G, G' y F necesarias para el cálculo de la ley de control y el predictor.

2.3. Conceptual

2.3.1. Automatización de canales principales de riego

La necesidad de mejorar la efectividad de los sistemas de control en canales de riego e introducir las ventajas de la automatización en este tipo de procesos, cada vez más complejos y exigentes, ha motivado un gran esfuerzo de investigación y desarrollo que se ha venido prolongando de manera creciente en las últimas décadas.

a) Canales principales de riego

Un canal principal de riego es un sistema hidráulico abierto cuyo principal objetivo es transportar el agua desde una fuente de alimentación (presa, reservorio, río, entre otros) a diferentes usuarios, controlando su flujo a través de la modificación de la apertura de varias compuertas [32, 38] En general, el agua tiene que ser distribuida:

- De acuerdo al volumen disponible.
- En forma flexible, ajustándose a los cambios en la demanda.
- De forma segura, evitando inundaciones, roturas y fallas en los equipos.
- De manera económica, reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

El grado de flexibilidad depende de la demanda. Existen diferentes métodos para realizar esta operación [33, 43, 32]. En la mayoría de casos, el operador necesita ejercer alguna acción sobre las estructuras de control del canal.

En la figura 7, se muestra un esquema simplificado de un canal principal de riego, donde $Q_R, Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_i$ representan el caudal de agua en el reservorio y en los diferentes tramos, $q_1, q_2, q_3, \dots, q_i$ son las descargas laterales, $y_R, y_1, y_2, y_3, \dots, y_{i+1}$ son el nivel de agua en los diferentes tramos (variables controladas), $u_1, u_2, u_3, \dots, u_i$ representan la magnitud de apertura de las compuertas (variables de control) de los tramos.

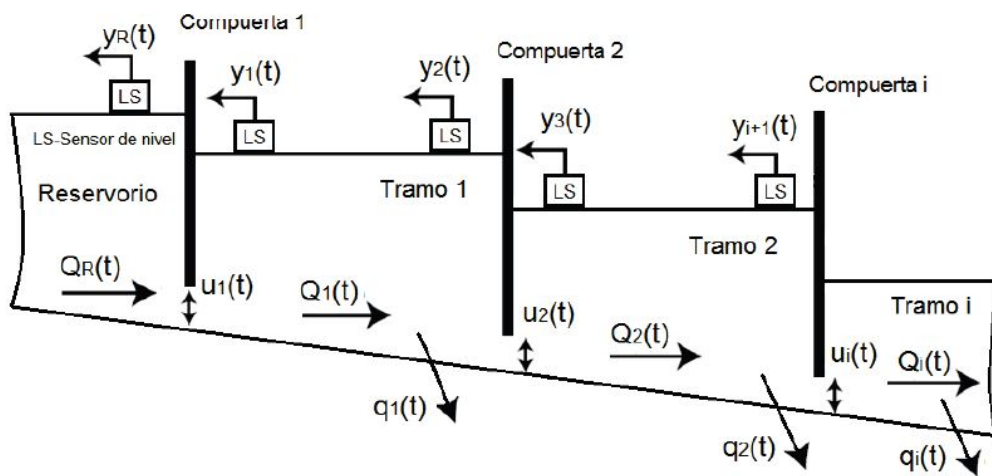


Figura 7: Representación esquemática de un canal principal de riego.

Fuente:[11]

Las estructuras de control, en este caso compuertas sumergibles, son operadas en cierto orden para controlar la distribución de agua [38, 39]. Habitualmente, estas estructuras incluyen elementos eléctricos y mecánicos. La sección de canal ubicada entre dos estructuras de control se denomina tramo. Las estructuras más utilizadas en la distribución de agua en los canales principales de riego son las compuertas sumergibles y las compuertas por desbordamiento como las mostradas en las figuras 8 y 9.

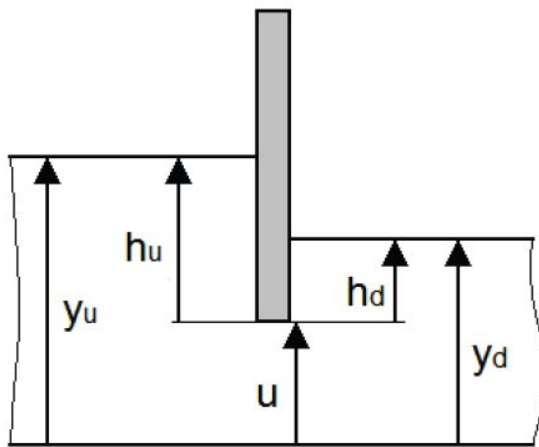


Figura 8: Diagrama simplificado de una compuerta sumergible.

Fuente:[11]

En las figuras 8 y 9 se tiene que y_u es el nivel aguas arriba, y_d es el nivel aguas abajo, u es la magnitud de apertura de la compuerta, h_u y h_d son los niveles diferenciales aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

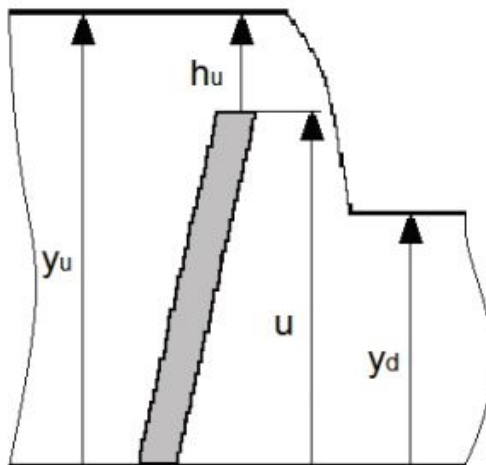


Figura 9: Diagrama simplificado de una compuerta por desbordamiento.

Fuente:[11]

Para funcionar apropiadamente, las estructuras de control necesitan que el nivel aguas arriba sea el requerido. Por lo que el nivel de agua en el canal

necesita mantenerse en un rango de operación adecuado. Básicamente, hay tres métodos de regular la distribución de agua en canales de riego [43, 33, 45, 32]:

- Método de regulación aguas abajo.
- Método de regulación aguas arriba.
- Método combinado.

b) **Métodos de control en canales principales de riego**

Existen múltiples criterios para clasificar los distintos sistemas propuestos para el control de la distribución de agua en canales de riego. Los criterios fundamentales son [31, 45, 32]:

- Las variables consideradas.
- Las estrategias de control.
- Los métodos de diseño del controlador.
- La implementación.

c) **VARIABLES CONSIDERADAS**

Para el sistema de control se consideran tres grupos de variables: las variables controladas, las variables de control y las perturbaciones.

■ **VARIABLES CONTROLADAS**

Las variables controladas son aquellas que se requieren mantener en determinados valores. En el caso de un canal principal de riego estas variables son principalmente de dos tipos: caudales y niveles. Las necesidades hídricas de los usuarios se pueden definir en términos de caudales. Existen diversos sistemas de control que utilizan el caudal como variable controlada. No obstante medir caudal en un canal es complejo y

muchos canales no disponen de los sensores requeridos El nivel de agua es una variable cuya medición es relativamente más fácil, por lo que se utiliza con frecuencia en los sistemas de control. Los niveles controlados pueden ser aguas abajo, aguas arriba o en un punto central del tramo controlado.

■ **Variables de control**

Las variables de control habituales son las aperturas de compuerta, los incrementos de apertura de la compuerta, y los caudales. Considerar las aperturas de compuerta o sus incrementos permite tener en cuenta la compleja dinámica asociada a la apertura de la compuerta y a los niveles aguas arriba y aguas abajo de ésta. En el caso en el que la variable de control es un caudal, éste deberá convertirse en apertura de compuerta, para que sea aplicable al sistema, mediante la inversa de la ecuación de la compuerta o mediante un controlador local monovariante. Considerar caudales permite desacoplar el sistema en subsistemas, lo cual es interesante cuando se utilizan controladores locales monovariantes, aunque no tiene en cuenta la dinámica asociada a la apertura de la compuerta de modo que el comportamiento global del sistema no puede asegurarse.

■ **Perturbaciones**

Las perturbaciones son generalmente desconocidas. Las más importantes son las extracciones y las aportaciones extras debido a lluvias. Normalmente estas perturbaciones no se pueden cuantificar, pero sus efectos sobre las variables medidas permiten detectar su presencia.

d) **Estrategias de control**

Se distinguen dos tipos de estrategias en función de la naturaleza de la información utilizada para calcular la acción de control del sistema: feedback y

feedforward. La estrategia feedback es aquella, en la que el error de control es medido y utilizado para determinar las acciones de control. Mientras que la estrategia feedforward es aquella, en el que las perturbaciones se miden (o predicen) y se usan para determinar las acciones de control. En las Figuras 10 y 11, se muestran diagramas de estas estrategias. En ambos casos, el operador trata de mantener el nivel del agua fijado ajustando la posición de la compuerta aguas arriba. En la Figura 10, el operador controla el nivel del agua utilizando información sobre el caudal en las estructuras de extracción. Este caudal no puede ser controlado por el operador, por lo tanto puede ser considerado como una perturbación. Cuando estas perturbaciones son medidas y utilizadas para determinar las acciones de control, se denomina *feedforward*.

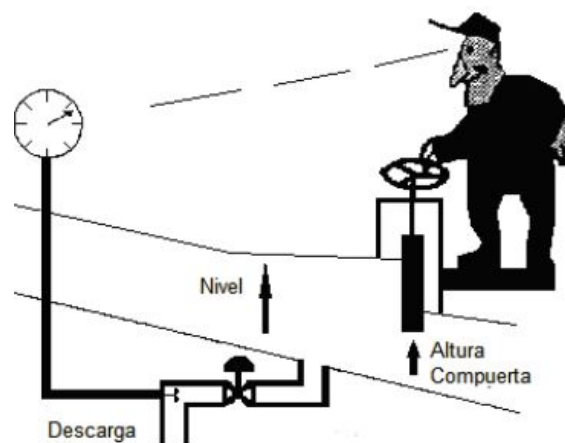


Figura 10: Diagrama de la estrategia de control feedforward.

Fuente:[11]

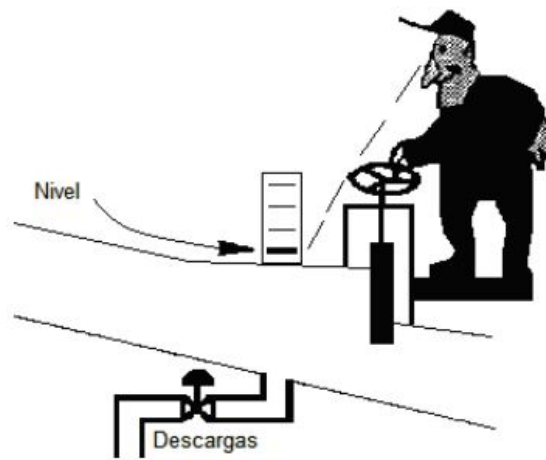


Figura 11: Diagrama de la estrategia de control feedback.

Fuente:[11]

En la Figura 11, el operador controla el nivel del agua usando información acerca de la desviación entre el nivel de agua actual y el establecido como objetivo, lo que se denomina feedback.

Estos dos procesos pueden ser representados en diagramas en bloques como los mostrados en la figura 12 y 13. El operador actúa como un sistema de control que genera una entrada de control. En el caso de la estrategia feedforward, la perturbación ingresa al sistema de control. Mientras que en la estrategia feedback el error de control ingresa al sistema de control.

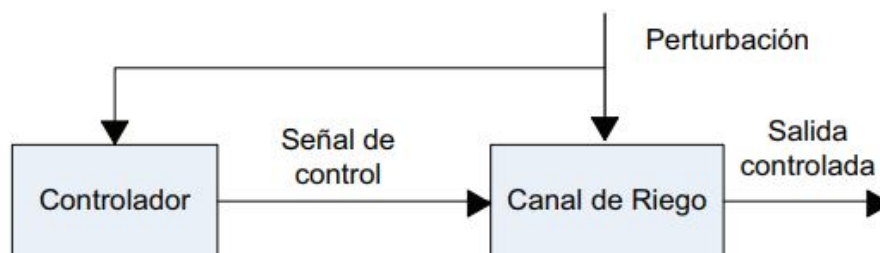


Figura 12: Diagrama en bloques del sistema de control feedforward.

Fuente:[11]

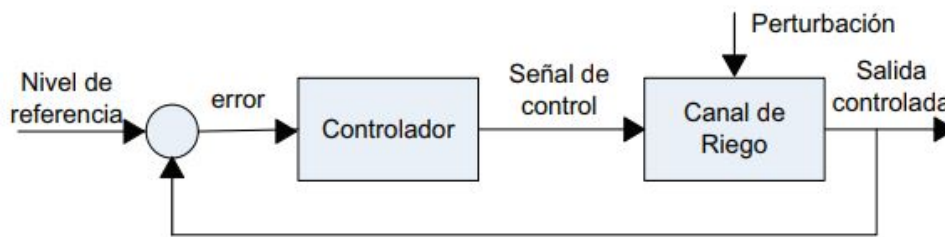


Figura 13: Diagrama en bloques del sistema de control feedback.

Fuente:[11]

El control feedback puede reducir el efecto de cualquier perturbación sobre la salida controlada, independientemente de su naturaleza.

El control feedforward puede reducir el efecto de las perturbaciones sobre las salidas controladas, pero para ser efectivo, el comportamiento dinámico de la perturbación debe conocerse bien. En la práctica la efectividad del control feedforward es limitada, ya que no es posible medir todas las perturbaciones y conocer perfectamente su comportamiento dinámico.

El control feedforward y feedback pueden ser combinados, tal como se muestra en la figura 14. Si la perturbación es medida o predicha e ingresada al controlador, solamente el efecto del error tiene que ser reducido por el lazo feedback. El sistema de control resultante puede ser muy preciso [43, 31].

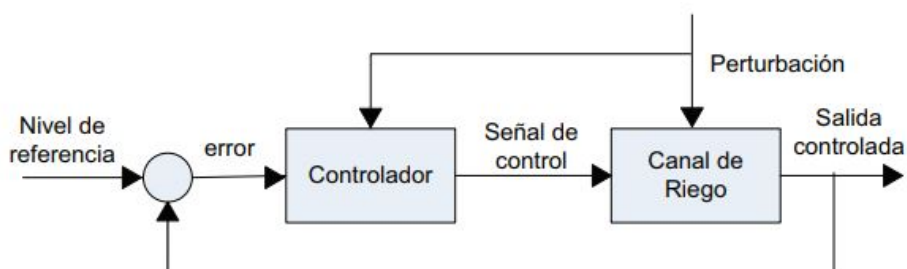


Figura 14: Diagrama en bloques del sistema de control feedback y feedforward.

Fuente:[11]

En literatura sobre control de canales de riego, la estrategia de control en

donde una estructura de control se ajusta basada en información aguas abajo, con frecuencia se denomina control aguas abajo [31, 32]. En esta estrategia, la acción de control consiste en variar el nivel aguas abajo del tramo. La compuerta situada aguas arriba es la encargada de realizar dicha acción (ver figura 15). Descargas, niveles, caudales o volúmenes pueden ser reguladas por este tipo de control.

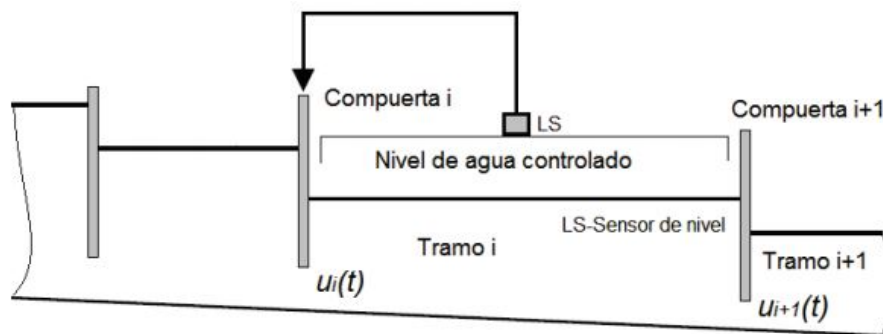


Figura 15: Esquema de control aguas abajo.

Fuente:[11]

En el control aguas arriba la acción consiste en variar el nivel aguas arriba, en este caso, la compuerta que actúa es la compuerta situada aguas abajo del tramo. Solamente niveles o volúmenes pueden ser regulados con este tipo de estrategia de control (ver figura 16).

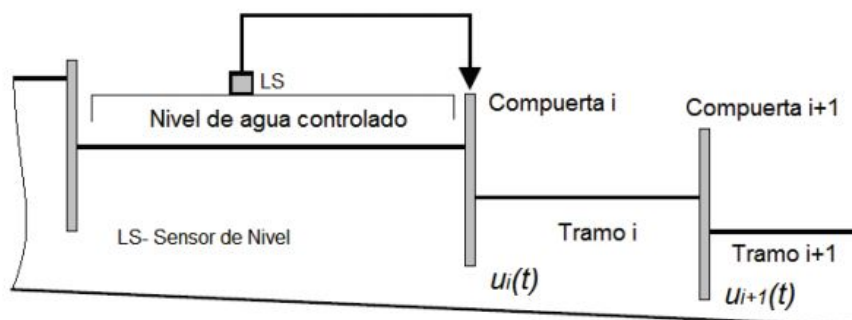


Figura 16: Esquema de control aguas arriba.

Fuente:[11]

El control mixto combina las estrategias aguas arriba y aguas abajo tal como se aprecia en la figura 17 [31, 32].

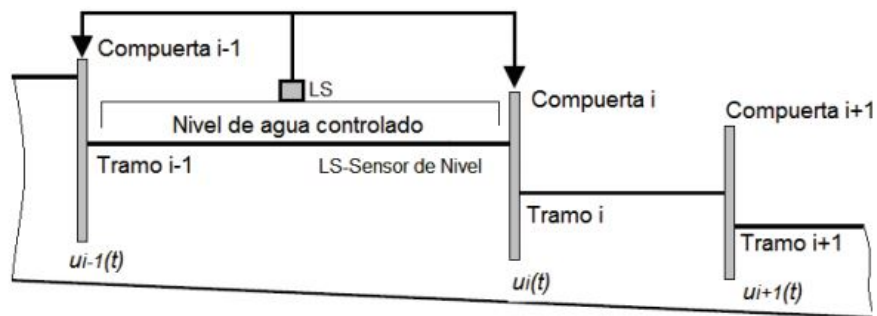


Figura 17: Esquema de control mixto.

Fuente:[11]

e) Métodos de diseño

Los métodos de diseño hacen referencia a la base matemática o metodología utilizada dentro del algoritmo de control para generar la acción de control a partir de las variables medidas.

Estos métodos pueden ser divididos en diferentes categorías, así se tiene métodos: lineales/no lineales, clásicos/robusto, frecuencia/dominio del tiempo, basados en modelo/no basados en modelo, feedback/feedforward, centralizado/descentralizado, offline/online, monovariantes SISO/multivariantes MIMO.

A estas técnicas se le han incorporado componentes adicionales para mejorar el desempeño del algoritmo de control tomando en cuenta características específicas de los canales de riego (retardo de tiempo, perturbaciones, no linealidad). Como ejemplo de estos elementos se tiene filtros, protección de saturación del integrador (antiwindup), desacopladores, observadores, ganancia programada o ajuste adaptativo. En los trabajos realizados al respecto, la mayoría de los métodos desarrollados para el control de canales de riego se basan en técnicas de control lineal, utilizando controladores monovariantes

en lazo cerrado: PID, PI, y P, los cuales han sido ajustados utilizando modelos simplificados del proceso [2, 31, 25, 32].

Aunque eficientes en la mayoría de los casos, los controladores PID, PI, y P, no consideran explícitamente una de las características principales de la dinámica de los canales de riego, el retardo de tiempo [32]. Por ello se ha utilizado el predictor de Smith o se han desarrollado combinaciones, por ejemplo un controlador PI asociado a un predictor de Smith, para resolver esta problemática [32, 4].

Sin embargo, el funcionamiento global de los controladores lineales no ha sido suficiente debido al comportamiento dinámico complejo que presenta un canal de riego, por lo que se han desarrollado controladores descentralizados usando optimización lineal cuadrática, optimización no lineal, entre otros, para mejorar la eficiencia de los sistemas de control [2, 21, 15, 22, 4, 16].

Métodos heurísticos monovariantes basados en razonamientos hidráulicos y no en la teoría de control de igual forma han sido propuestos. Si bien son citados en la literatura estos apenas son operacionales [32]. Estos métodos se ajustan sobre un modelo de simulación o sobre el sistema real. La principal desventaja de los métodos heurísticos radica en que no se puede ajustar o comprobar su desempeño mediante una herramienta matemática.

Debido a los retardos de tiempo inherentes a los sistemas hidráulicos, perturbaciones, incertidumbres, características no lineales, y las interacciones entre subsistemas, muchos métodos de control avanzado han sido probados y están siendo desarrollados. Algunos han sido usados en simulación o experimentalmente en canales reales o modelos de canales a escala. Una gran parte de estos algoritmos pueden ser descritos en el espacio de estados o en forma de función transferencial, las representaciones matemáticas resultantes no son tan diferentes. La principal diferencia es el orden del controlador y

la manera en que los parámetros son ajustados.

Se pueden citar algunos ejemplos como el control por modelo interno, en los que la dinámica de proceso de control es modelada y utilizada en el controlador [23, 45]. El controlador basado en el ajuste mediante asignación de polos, utilizado para sistemas con grandes retardos de tiempo. Los controladores predictivos que usualmente se han aplicado al caso monovariado, aunque también esta técnica ha sido extendida a casos multivariados [32, 42, 45]. Para considerar las características no lineales del modelo se han desarrollado controladores adaptativos o controladores con ganancia programada.

Métodos basados en controladores difusos, expertos, neuronales y algoritmos genéticos, igualmente han sido propuestos. En algunos casos este tipo de enfoque es utilizado con controladores clásicos [13, 34]. Algunos métodos de optimización también han sido empleados, estos son en esencia multivariados. Entre los que se puede citar, optimización lineal, optimización no lineal, y control óptimo. La aplicación de estos métodos está limitada debido a las restricciones en tiempo real y a que la determinación de las condiciones iniciales reales requeridas para la optimización no es fácil. La minimización de la norma H_2 , también ha sido probada en canales de riego, esta aproximación tiene la ventaja de permitir seleccionar la estructura del controlador multivariado, específicamente para el diseño de un controlador descentralizado [27, 44].

Dado que una característica importante de los canales de riego son las grandes perturbaciones y los errores de modelado debido a los efectos de la no linealidad y de la dinámica no modelada, el control robusto basado en normas como la H_∞ es una aproximación que ha sido también aplicada [20].

Las técnicas no lineales, basadas en las ecuaciones de Saint-Venant, empleando métodos de control no lineal han sido propuestos [10, 12, 20, 20], [12]. El desarrollo de estas técnicas es complejo, lo que reduce su aplicabili-

dad. Los métodos de control monovariantes requieren dividir el canal en varios subsistemas, sin considerar la interacción entre ellos. Debido a que un canal es un sistema multivariable con grandes interacciones entre sus subsistemas, una posible solución es considerar el proceso global multivariable como una serie de procesos monovariantes independientes actuando en paralelo [32]. Hasta el día de hoy se han desarrollado diversos métodos multivariantes, aunque su utilización práctica en el control de canales es casi nula [32].

f) **Implementación en canal**

La implementación de un método de control para un canal de riego, comprende diversos aspectos como son: la configuración (centralizado o descentralizado), los elementos de acción final (compuertas manuales o automáticas), la instrumentación (sensores de nivel, controladores de caudal, disposición de compuertas, entre otros), los sistemas de comunicación, y los controladores (mecánicos, electrónicos, entre otros). Dentro de estos aspectos, juega un papel importante la configuración [31].

La configuración de los sistemas de control de la distribución de agua en un canal de riego tiene relación con la ubicación del controlador y las variables controladas y con la jerarquía entre controladores. Estos sistemas en correspondencia con la configuración se subdividen en los siguientes grupos: local, local con sensor alejado, semi-local, centralizado y jerárquico. En un sistema de control local (ver figura 18), la compuerta de cada tramo es accionada por un controlador independiente, que solo usa información local, es decir las variables medidas en cada tramo del canal. Diferentes investigaciones han sido dedicadas al diseño de sistemas de control local de la distribución de agua en un tramo de un canal [15, 16].

Un sistema de control local con sensor alejado (ver figura 19) difiere del anterior en que las variables controladas son medidas en una zona alejada de la

compuerta aguas arriba del tramo. Diversos autores han reportado investigaciones en este campo [25, 32]. En un control semi-local (ver figura 20), no se realiza un control global del sistema, pero los controladores no solo utilizan su propia información, sino que también utilizan información generada por los controladores adyacentes [32].

En un sistema de control centralizado (ver figura 21), existe un único controlador que utiliza la información de todos los tramos para generar las acciones de control de cada una de las compuertas del canal [25, 32].

En un sistema de control jerárquico (ver figura 22), existe una jerarquía de control. La acción de control está en función de las decisiones tomadas en los distintos niveles [3, 19].

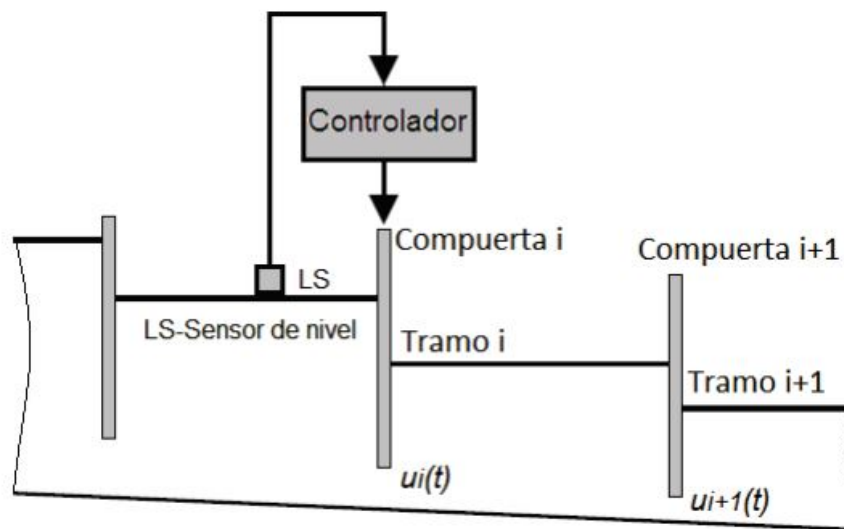


Figura 18: Esquema simplificado de un sistema de control local.

Fuente:[11]

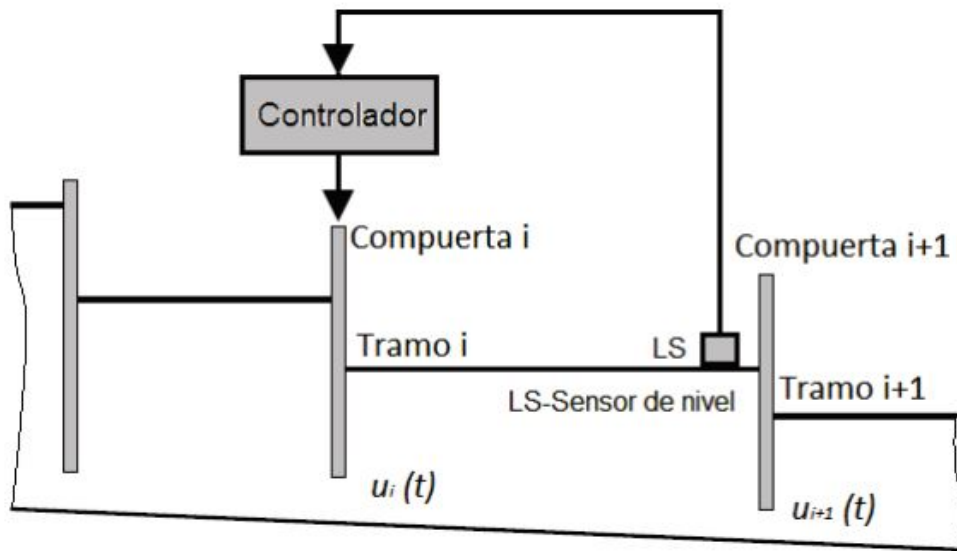


Figura 19: Esquema simplificado de un sistema de control local con sensor alejado.

Fuente:[11]

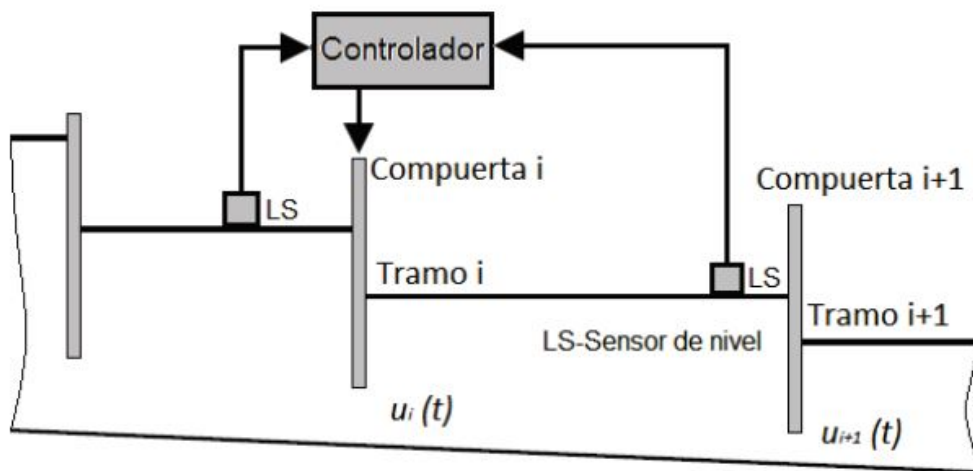


Figura 20: Esquema simplificado de un sistema de control semi-local.

Fuente:[11]

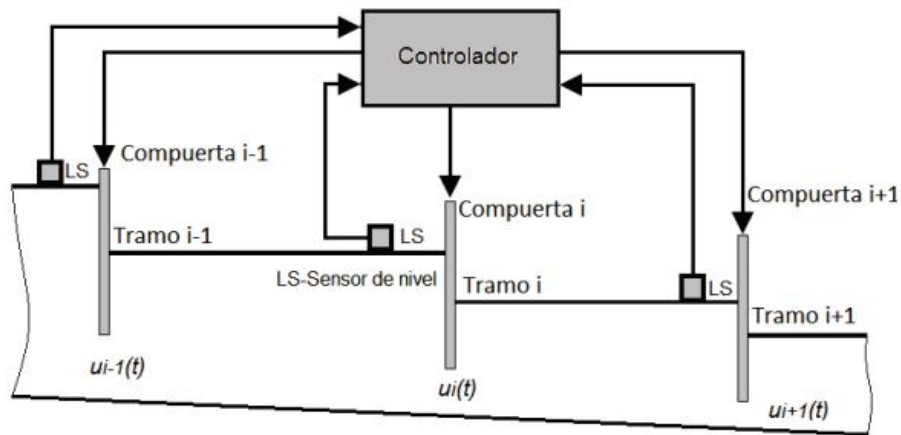


Figura 21: Esquema simplificado de un sistema de control centralizado.

Fuente:[11]

Como se ha podido apreciar, en los últimos años se han desarrollado diferentes soluciones para tratar de resolver el problema del control efectivo de la distribución de agua en de canales principales de riego. Sin embargo solo dos estrategias han sido realmente implementadas: los controladores convencionales (PID y sus variantes), y el control predictivo.

La primera estrategia ha venido siendo hasta hoy el estándar del control en canales de riego y la segunda representa un nuevo cauce en el que problemas del control efectivo de la distribución de agua en canales principales de riego pueden encontrar una solución adecuada, que posibilite disminuir las grandes pérdidas existentes, así como aumentar la efectividad en la distribución de agua.

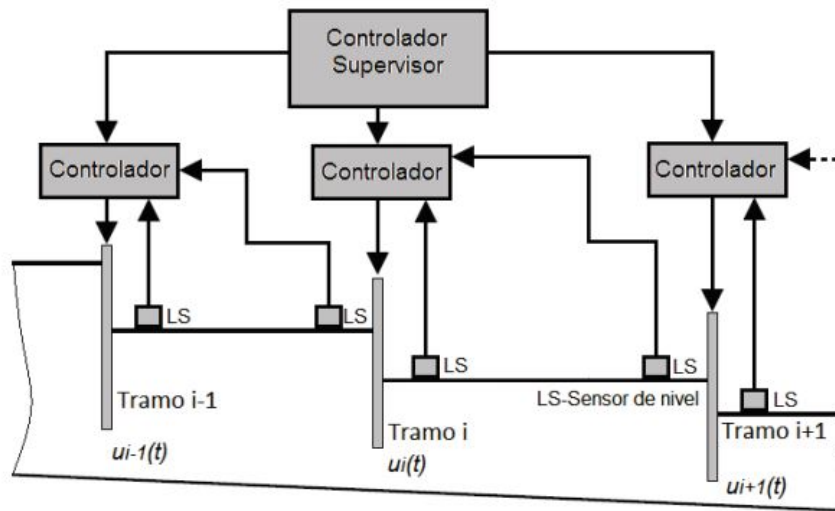


Figura 22: Esquema simplificado de un sistema de control jerárquico.

Fuente:[11]

2.4. Definición de términos básicos

- **ANA.** Autoridad Nacional del Agua.
- **GPC.** Control predictivo generalizado.
- **Feedback.** Es un sistema de control retroalimentado a aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y alguna entrada de referencia, comparándolas y utilizando la diferencia como medio de control.
- **Feedforward.** Es un sistema de control que mide las perturbaciones que llegan al sistema y actúa controlando al sistema para compensar las perturbaciones y que no modifiquen su salida. Este método de control permite prever las modificaciones que va a sufrir el sistema y las compensa antes de que la salida del sistema cambie.
- **Caudal.** Es la cantidad de fluido que circula a través de una sección de un ducto, ya sea tubería, cañería, oleoducto, río, canal, por unidad de tiempo.

Generalmente, el caudal se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área determinada en una unidad de tiempo específica.

- **Aguas abajo.** Con relación a una sección de un curso de agua, se dice que un punto está aguas abajo, si se sitúa después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente. Otra expresión también usada es río abajo. En castellano se utiliza también el término ayuso para referirse a aguas abajo.
- **Aguas arriba.** Es el contrario de la definición anterior, es decir, que el punto avanza en dirección contraria a la corriente. También se puede decir río arriba. En castellano se utiliza también el término asuso con el mismo significado.
- **Compuerta.** Es un dispositivo hidráulico-mecánico destinado a regular el pasaje de agua u otro fluido en una tubería, en un canal, presas, esclusas, obras de derivación u otra estructura hidráulica.
- **Variables controladas.** Es la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente la variable controlada es la salida del sistema y cambia con el progreso del proceso.
- **Variable de control.** Es la cantidad o condición modificada por el controlador a fin de afectar la variable controlada. Estas afectan el curso del proceso y pueden ser medidas y cambiadas a voluntad.
- **Perturbación.** Es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida del sistema. Estas afectan directamente el curso del proceso pero no pueden ser cambiadas a voluntad.
- **Control.** Significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar al sistema la variable manipulada para corregir o limitar la desviación

del valor medido, respecto al valor deseado.

- **Hídrico.** Del agua o relacionado con ella.
- **PLC.** Un controlador lógico programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller) o por autómatas programables, es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas.
- **Canal de riego.** Los canales de riego tienen la función de conducir el agua desde la captación hasta el campo o huerta donde será aplicado a los cultivos.
- **Algoritmo.** Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas.
- **Percolación.** Se refiere al paso lento de fluidos a través de materiales porosos.
- **Escorrentía superficial.** Describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo de agua.
- **Automatización.** Es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para fines industriales.
- **Fluido.** Un fluido es todo cuerpo que tiene la propiedad de fluir, y carece de rigidez y elasticidad, y en consecuencia cede inmediatamente a cualquier fuerza tendente a alterar su forma y adoptando así la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos pueden ser líquidos o gases según la diferente intensidad de las fuerzas de cohesión existentes entre sus moléculas.

- **Flujo.** Movimiento de un fluido.
- **Controlador.** Es un programa informático que permite al sistema operativo interactuar con un periférico, haciendo una abstracción del hardware y proporcionando una interfaz (posiblemente estandarizada) para utilizar el dispositivo.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

a. Hipótesis General

Desarrollando un sistema de control predictivo generalizado mejora la distribución de agua en el canal viejo imperial.

b. Hipótesis Específicas

H1 Mediante la técnica de identificación experimental se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de un tramo del canal viejo imperial.

H2 Es posible diseñar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución del agua en el canal viejo imperial.

3.2. Definición conceptual de variables

De igual manera, operacionalizando las variables formuladas, se determinaron los indicadores pertinentes para cada una de las variables que a continuación se indican:

Variable X: Modelamiento de un sistema de control predictivo generalizado.

Variable Y: Distribución del agua en el canal principal del valle de Cañete.

3.2.1. Operacionalización de variables

Cuadro 2: Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable independiente Modelamiento de un sistema de control predictivo generalizado	Variables de control Variables controladas	Apertura de compuerta y nivel del agua
Variable dependiente Distribución del agua en el canal principal del valle de Cañete	Distribución de agua para los agricultores	Cantidad en metros cúbicos de agua

Fuente: Elaboración propia

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y Diseño de la investigación

4.1.1. Tipo

La investigación es teórica experimental, y tiene como propósito aplicar el uso del conocimiento científico para llegar a solucionar la demanda de los regantes del recurso hídrico.

4.1.2. Diseño

Esta investigación desarrollo un sistema de control predictivo generalizado para la distribución de agua en el valle Cañete, con la finalidad de mejorar la distribución de agua demandada por los regantes de la zona.

El proceso del diseño requerirá los siguientes pasos:

Identificación del comportamiento dinámico del canal viejo imperial.

La obtención del modelo matemático del tramo de canal bajo estudio se desarrolla mediante el procedimiento de identificación de sistemas. El término "Identificación de sistemas" adoptado por los especialistas de control, puede ser definido como la obtención de la estructura y los parámetros de un modelo matemático generalmente dinámico, que reproduce con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso bajo estudio [1].

La identificación de sistemas es el campo del modelado matemático que utiliza datos experimentales de la planta como punto de partida, a los cuales se les aplican técnicas estadísticas con el fin de ajustar los datos a una estructura de modelo determinada [28]. En este caso, no hay necesidad de conocer las leyes internas que gobiernan el comportamiento del sistema, únicamente se conside-

ran los valores de las variables manipulada y controlada. Por ello, los modelos obtenidos mediante estas técnicas se denominan de “caja negra” [28]. Un esquema general de este procedimiento se muestra en la figura 23

Procedimiento de identificación.

En términos generales, el experimento de identificación se realiza excitando al sistema (usando algún tipo de señal de entrada: escalón, sinusoidal, señal binaria pseudoaleatoria o aleatoria) y observando las señales de entrada y salida en un intervalo de tiempo. Estas señales son normalmente recolectadas en un computador para luego procesar esta información [28].

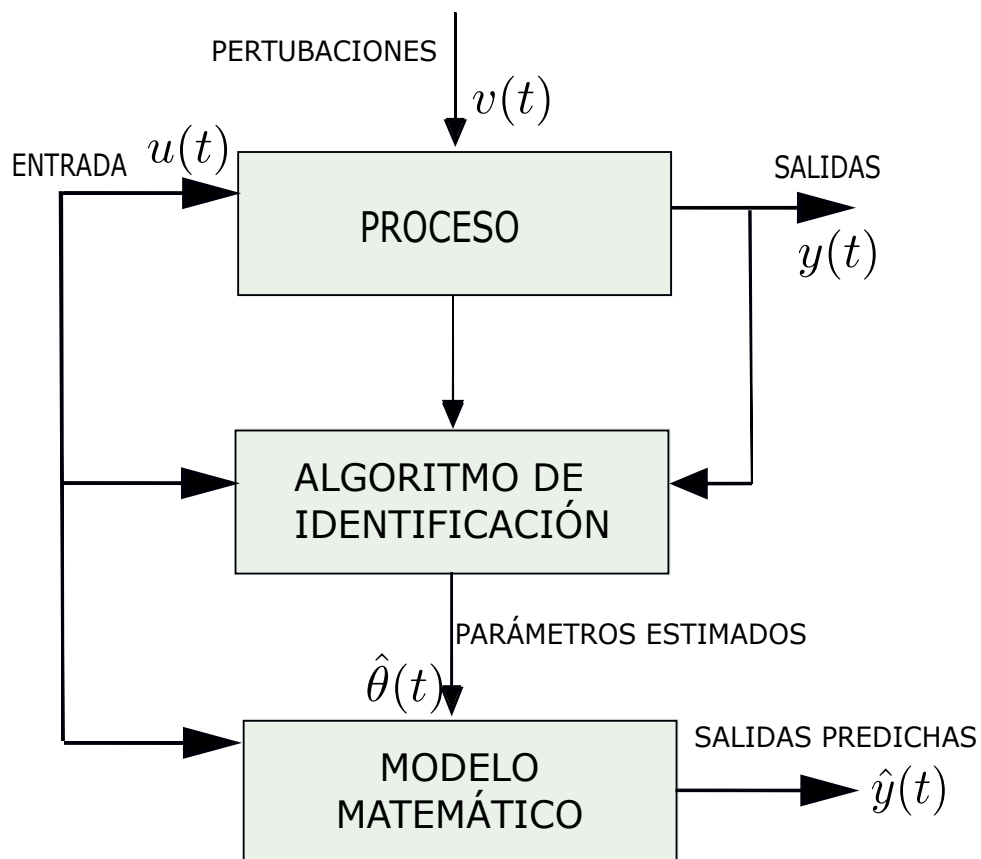


Figura 23: Diagrama de flujo del esquema general de identificación de sistemas.

Fuente: Elaboración propia

En la práctica, la estimación de los parámetros del proceso se realiza de forma iterativa. Esto significa que una estructura tentativa es elegida y los parámetros correspondientes son estimados. El modelo obtenido es examinado para comprobar si es una representación apropiada del sistema. Si este no es el caso, alguna otra estructura más compleja debe ser considerada. El proceso iterativo de obtener un modelo a partir de datos de entrada y salida se muestra en la figura 24 y comprende las etapas siguientes [28]:

- Diseño del experimento y adquisición de datos: se debe seleccionar las variables de entrada (variable manipulada), de salida (variable controlada) y perturbaciones, se excita el sistema mediante diferentes señales de entrada, y se registran los valores durante un intervalo adecuado de tiempo.
- Tratamiento previo de los datos experimentales: se examinan y acondicionan los datos (filtrar los datos, eliminar datos espurios, entre otros).
- Selección de la estructura del modelo: se busca el mejor modelo disponible que refleje el comportamiento del sistema. Se incluyen estructura, retardos, linealidad.
- Estimación de los parámetros: se selecciona un algoritmo particular para determinar los parámetros, el cual minimice un índice de ajuste que refleje el nivel de proximidad del modelo respecto al comportamiento del sistema a identificar.
- Validación del modelo: esto engloba un análisis en el tiempo y en la frecuencia del modelo.

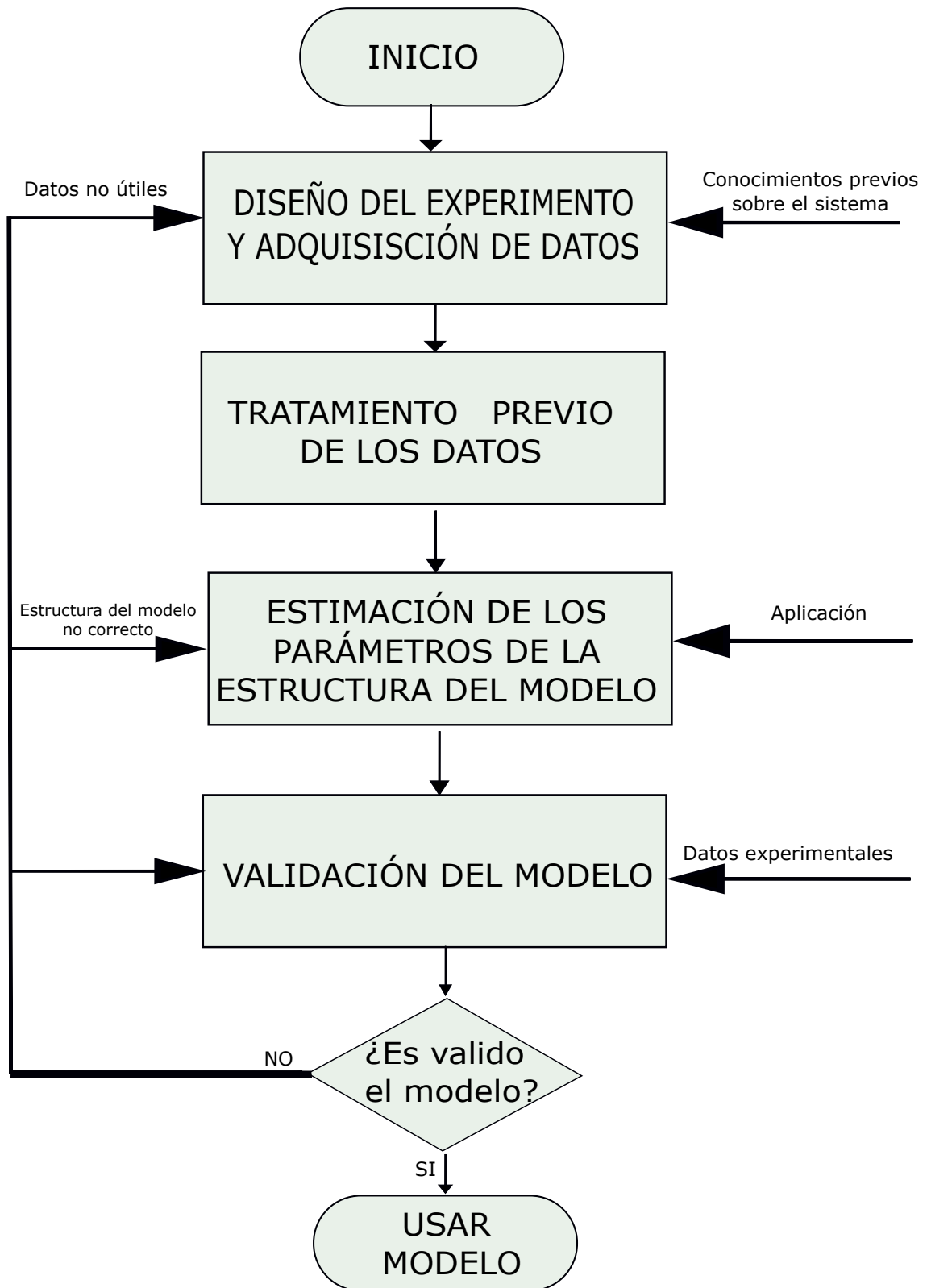


Figura 24: Diagrama de flujo de identificación de sistemas.

Fuente: Elaboración propia

La identificación no es una metodología totalmente segura. Si el modelo no es satisfactorio, se tendrá que regresar a cualquiera de las etapas anteriores y modificar el método de identificación, la estructura del modelo o los datos experimentales. Esto puede suceder debido a las siguientes razones:

- Se debe encontrar una apropiada estructura de modelo. Esto puede ser una dificultad, sobre todo si la dinámica del sistema es no lineal.
- Presencia de datos no perfectos. Se debe tener en cuenta que los datos pueden estar afectados por ruidos.
- El proceso puede variar con el tiempo, lo cual puede causar un problema, sobre todo si se intenta describir con un sistema invariante en el tiempo.
- Puede ser dificultoso o imposible medir alguna variable o señal de importancia para el modelo.

Procedimiento para la implementación del GPC

El proceso de implementación del control predictivo generalizado GPC lo vamos a resumir en el siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 25.

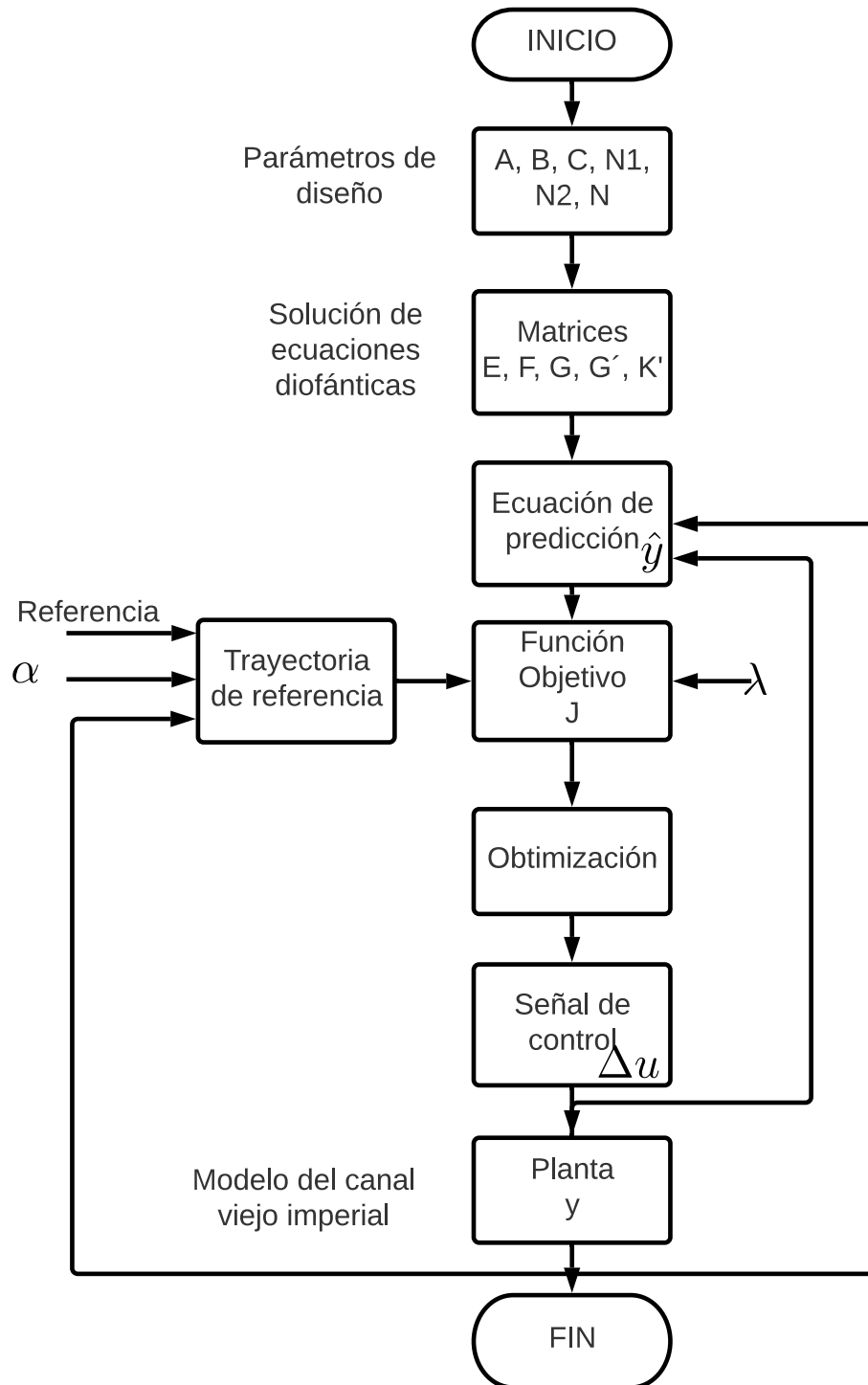


Figura 25: Diagrama de flujo del sistema de GPC.

Fuente: Elaboración propia

4.2. Método de investigación

- **Correlacional:** En nuestro trabajo de investigación notamos la necesidad de relacionar el comportamiento de la variable de entrada con el de la salida.
- **Longitudinal:** Determinamos el modelo matemático que rige la dinámica de un canal cuando el nivel de agua es alto.
- **Experimental:** Realizamos un conjunto de actividades metódicas y técnicas para recabar toda la información y datos del canal de riego objeto de investigación.

4.3. Población y Muestra

La población estará determinada por todas las compuertas del canal viejo imperial y la muestra fue la compuerta número 36.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

El canal viejo Imperial, se encuentra ubicado en la provincia de Cañete departamento de Lima, el cual tiene una longitud de aproximadamente 22 km con 77 compuertas, el caudal de descarga es de 1500 litros por segundo, una profundidad variable de 1,5 m a 1,9 m, una sección transversal de forma trapezoidal y tiene una pendiente promedio de 0,016 m/km. La superficie regada es de aproximadamente 3603 ha. Este tramo de canal suministra agua, a través de compuertas de extracción lateral ubicada aguas abajo, el cual abastece de agua a las áreas de cultivo. En la figura 26 se muestra el diagrama simplificado del canal viejo imperial.

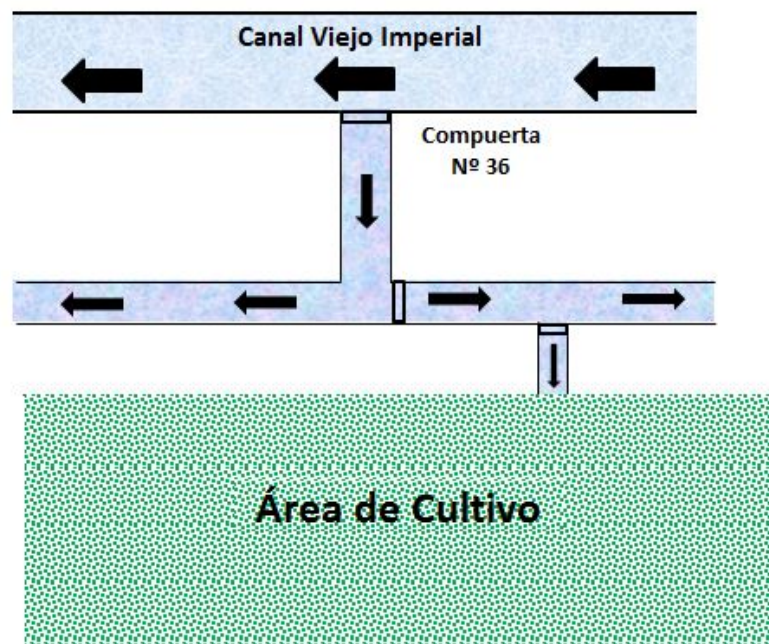


Figura 26: Esquema simplificado del canal viejo imperial.
Fuente: Elaboración propia



Figura 27: Tramo del canal viejo imperial.
Fuente: Elaboración propia



Figura 28: Compuerta número 36 del canal viejo imperial.
Fuente: Elaboración propia



Figura 29: Compuerta tipo tarjeta.
Fuente: Elaboración propia

La operación de este tramo de canal se realiza través del método de inundación. Las mediciones disponibles son el nivel aguas abajo del tramo y la posición de la compuerta aguas arriba. El sensor de nivel está instalado en un tranquilizador, con el fin de evitar que las olas producidas por la apertura de compuertas y el movimiento del agua produzcan variaciones no deseadas en las mediciones. Este sensor es de ultrasonido y está fijado sobre un travezaño de hierro, los datos son transferidos a un módulo de adquisición de datos.

Tomando en cuenta que el nivel aguas abajo alejado es la variable controlada y la posición de compuerta aguas arriba es la variable manipulada, el modelo matemático a obtener debe considerar el nivel aguas abajo $y_{dwVI}(t)$ como variable de salida y la posición de la compuerta aguas arriba $u_{VI}(t)$ como variable de entrada. Se considera que la perturbación externa fundamental que tiene el tramo es la descarga lateral $q_{VI}(t)$. Un esquema simplificado del tramo y las variables descritas, se muestran en la figura 30.

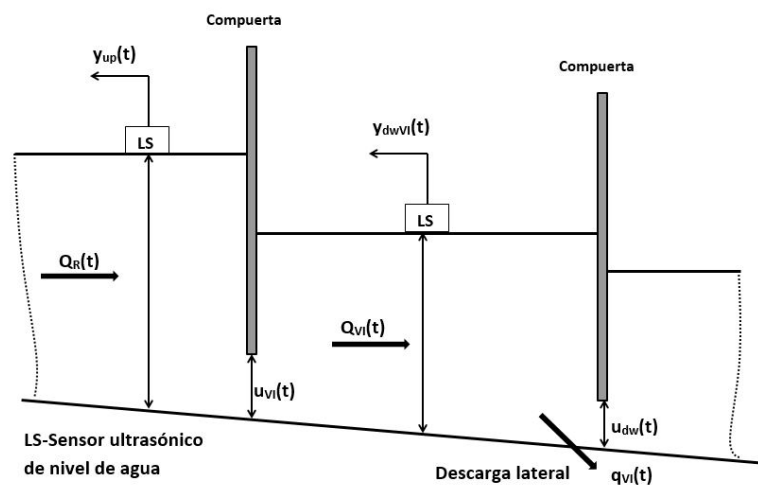


Figura 30: Esquema simplificado del canal viejo imperial.

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de operación del canal se resumen en el cuadro 3.

Cuadro 3: Parámetro de operación del canal viejo imperial

Parámetro	Valor
Nivel nominal de aguas abajo $y_{nominal}$	34 cm
Nivel máximo aguas abajo y_{mx}	78 cm
Nivel mínimo aguas abajo y_{mn}	20 cm
Máxima apertura de compuerta u_{mx}	150 cm

Fuente: Elaboración propia

La investigación se realizó durante los meses de diciembre 2018 a noviembre 2019.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

Para la recolección de la información de campo se realizarán visitas periódicas para obtener información relevante (caudal, números de compuertas, cantidad de hectáreas a regar longitud del canal, etc) proporcionado por la junta de usuarios del sub-distrito de riego Cañete.

Para la adquisición de datos se utilizó el sensor de ultrasonido UK1D/E2-0EUL, este mide la distancia entre el sensor y el agua del canal viejo imperial mediante el uso de ondas ultrasónicas, el cual envía una señal analógica en un rango de 4-20 mA a un módulo de adquisición de datos Advantech ADAM-4017+-CE generando una señal digital que fue procesada por el ordenador mediante un convertidor RS485 a USB 2.0 y el software AdamApax NET Utility, los datos digitales (miliamperios) se trasladaron después a unidades de ingeniería (cm). En la figura 31 se muestra el esquema de conexión del sensor con el módulo de adquisición de datos y la pc, además en la figura 32 se muestra los datos almacenados en un archivo de microsoft excel.

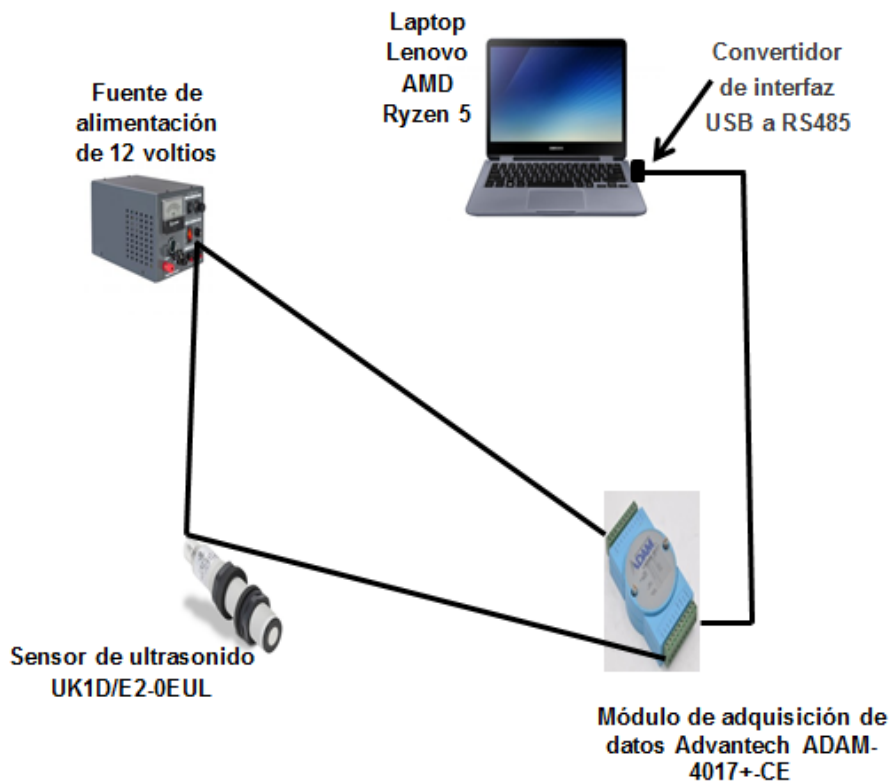


Figura 31: Esquema de adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	1,19.944	31,19.943	61,19.945	91,19.945	121,19.945	151,19.945	181,19.944	211,19.944	241,19.945	271,19.945	301,19.944	331,19.943	361,18.411	391,16.773	421,16.359	451,16.044	481,15.729
2	2,19.946	32,19.945	62,19.944	92,19.945	122,19.946	152,19.945	182,19.947	212,19.945	242,19.945	272,19.945	302,19.945	332,19.944	362,18.340	392,16.758	422,16.271	452,16.040	482,15.715
3	3,19.945	33,19.945	63,19.945	93,19.943	123,19.946	153,19.945	183,19.945	213,19.945	243,19.944	273,19.946	303,19.942	333,19.943	363,18.093	393,16.735	423,16.166	453,16.148	483,15.727
4	4,19.945	34,19.945	64,19.943	94,19.946	124,19.944	154,19.944	184,19.944	214,19.943	244,19.945	274,19.945	304,19.942	334,19.943	364,17.943	394,16.735	424,16.183	454,16.022	484,15.727
5	5,19.945	35,19.945	65,19.945	95,19.946	125,19.945	155,19.945	185,19.944	215,19.944	245,19.945	275,19.946	305,19.944	335,19.943	365,17.855	395,16.764	425,16.280	455,15.928	485,15.727
6	6,19.945	36,19.946	66,19.943	96,19.944	126,19.943	156,19.943	186,19.944	216,19.945	246,19.947	276,19.944	306,19.943	336,19.943	366,17.666	396,16.750	426,16.182	456,16.066	486,15.727
7	7,19.945	37,19.945	67,19.943	97,19.945	127,19.945	157,19.944	187,19.944	217,19.945	247,19.944	277,19.944	307,19.944	337,19.942	367,17.702	397,16.556	427,16.263	457,15.888	487,15.727
8	8,19.945	38,19.945	68,19.945	98,19.945	128,19.944	158,19.945	188,19.946	218,19.943	248,19.944	278,19.943	308,19.945	338,19.945	368,17.633	398,16.716	428,16.258	458,16.024	488,15.727
9	9,19.945	39,19.945	69,19.943	99,19.945	129,19.945	159,19.945	189,19.945	219,19.945	249,19.944	279,19.945	309,19.945	339,19.943	369,17.462	399,16.690	429,16.165	459,16.087	489,15.727
10	10,19.943	40,19.945	70,19.945	100,19.945	130,19.944	160,19.944	190,19.946	220,19.945	250,19.945	280,19.945	310,19.945	340,19.944	370,17.404	400,16.600	430,16.124	460,15.977	490,15.727
11	11,19.944	41,19.945	71,19.945	101,19.945	131,19.945	161,19.945	191,19.945	221,19.944	251,19.945	281,19.945	311,19.943	341,19.943	371,17.399	401,16.608	431,16.100	461,15.973	491,15.727
12	12,19.945	42,19.944	72,19.944	102,19.945	132,19.945	162,19.945	192,19.945	222,19.945	252,19.945	282,19.945	312,19.943	342,19.944	372,17.435	402,16.498	432,16.115	462,16.158	492,15.727
13	13,19.946	43,19.944	73,19.944	103,19.945	133,19.944	163,19.945	193,19.945	223,19.944	253,19.944	283,19.946	313,19.943	343,19.944	373,17.319	403,16.534	433,16.099	463,15.983	493,15.727
14	14,19.943	44,19.944	74,19.945	104,19.944	134,19.945	164,19.945	194,19.945	224,19.943	254,19.945	284,19.944	314,19.945	344,19.944	374,17.221	404,16.495	434,16.239	464,15.944	494,15.727
15	15,19.945	45,19.946	75,19.943	105,19.945	135,19.945	165,19.944	195,19.945	225,19.944	255,19.945	285,19.945	315,19.945	345,19.943	375,17.315	405,16.501	435,16.298	465,16.031	495,15.727
16	16,19.944	46,19.945	76,19.945	106,19.946	136,19.945	166,19.944	196,19.943	226,19.945	256,19.945	286,19.944	316,19.943	346,19.943	376,17.272	406,16.638	436,16.115	466,16.027	496,15.727
17	17,19.945	47,19.944	77,19.945	107,19.945	137,19.943	167,19.945	197,19.945	227,19.945	257,19.943	287,19.944	317,19.945	347,19.945	377,17.254	407,16.545	437,16.050	467,15.875	497,15.727
18	18,19.943	48,19.943	78,19.945	108,19.946	138,19.944	168,19.945	198,19.944	228,19.945	258,19.944	288,19.945	318,19.945	348,19.943	378,17.192	408,16.560	438,16.130	468,16.025	498,15.727
19	19,19.945	49,19.945	79,19.944	109,19.945	139,19.945	169,19.943	199,19.946	229,19.945	259,19.945	289,19.943	319,19.943	349,19.944	379,17.182	409,16.544	439,16.145	469,16.032	499,15.727
20	20,19.945	50,19.946	80,19.945	110,19.945	140,19.944	170,19.943	200,19.943	230,19.945	260,19.943	290,19.944	320,19.945	350,19.944	380,17.120	410,16.584	440,16.172	470,15.904	500,15.727
21	21,19.946	51,19.944	81,19.946	111,19.945	141,19.943	171,19.945	201,19.943	231,19.944	261,19.944	291,19.943	321,19.943	351,19.945	381,17.066	411,16.502	441,16.171	471,15.877	501,15.727
22	22,19.946	52,19.946	82,19.943	112,19.944	142,19.944	172,19.945	202,19.943	232,19.945	262,19.944	292,19.945	322,19.945	352,19.943	382,16.978	412,16.390	442,16.111	472,15.833	502,15.727
23	23,19.944	53,19.943	83,19.945	113,19.945	143,19.945	173,19.945	203,19.945	233,19.943	263,19.944	293,19.944	323,19.944	353,19.943	383,17.041	413,16.501	443,16.072	473,16.094	503,15.727
24	24,19.944	54,19.945	84,19.945	114,19.944	144,19.945	174,19.945	204,19.945	234,19.945	264,19.945	294,19.943	324,19.943	354,19.943	384,16.910	414,16.528	444,16.147	474,15.951	504,15.727
25	25,19.945	55,19.944	85,19.943	115,19.946	145,19.945	175,19.944	205,19.945	235,19.945	265,19.944	295,19.943	325,19.945	355,19.945	385,16.886	415,16.249	445,16.109	475,15.847	505,15.727
26	26,19.945	56,19.945	86,19.945	116,19.943	146,19.946	176,19.945	206,19.944	236,19.944	266,19.943	296,19.945	326,19.945	356,19.940	386,16.835	416,16.427	446,16.078	476,15.959	506,15.727
27	27,19.945	57,19.945	87,19.944	117,19.944	147,19.945	177,19.944	207,19.945	237,19.943	267,19.945	297,19.945	327,19.943	357,19.935	387,16.900	417,16.463	447,16.050	477,15.914	507,15.727

Figura 32: Datos adquiridos en el experimento
Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Las pruebas se realizaron relacionando los indicadores de la variable independiente, utilizando el software científico MATLAB-SIMULINK.

4.6.1. Desarrollo del experimento.

Resulta necesario realizar experimentos sobre el tramo del canal de riego objeto de estudio con el fin de obtener datos de entrada-salida que permitan la obtención del modelo matemático. Para ello se excita el proceso con determinadas señales de entrada haciendo variar la salida. El experimento debe ser diseñado de tal forma que los datos obtenidos contengan la mayor información posible sobre el comportamiento dinámico del sistema, lo que implica un cuidadoso diseño del procedimiento para la adquisición de datos.

Como se mencionó anteriormente, el modelo matemático a obtener tendrá el nivel de agua aguas abajo $y_{dwVI}(t)$ como señal de salida, la magnitud de apertura de la compuerta aguas arriba $u_{VI}(t)$ como señal de entrada, y la descarga lateral $q_{VI}(t)$ así como los efectos de las interacciones de los tramos adyacentes aguas arriba y aguas abajo como perturbación $v(t)$.

Además, el modelo a obtener mediante el procedimiento experimental solamente describirá el comportamiento dinámico de la variación de nivel de agua en el punto de medición, y no ofrece información sobre la variación de nivel de agua en otros puntos del tramo del canal [38, 39]. Una excelente combinación de señales para la identificación consiste en la aplicación previa de un escalón en la variable de control y después aplicar una secuencia binaria pseudo aleatoria (SBPA). La respuesta escalón permitirá estimar tres parámetros importantes: la ganancia estática, el retardo de tiempo y las constantes de tiempo. La estimación de la constante de tiempo dominante, permitirá seleccionar adecuadamente el período de conmutación de la señal SBPA (5 a 7 veces menor que la menor

constante de tiempo del proceso) [1]. Las propiedades de los datos utilizados en la estimación de los parámetros son cruciales para obtener un modelo de buena calidad. Uno de estos parámetros es el período de muestreo T , el cual no debe ser muy pequeño ya que puede llevar a la obtención de datos redundantes que no aportan información sobre el sistema; ni muy grande, que se pierda información fundamental a la hora de identificar la dinámica del sistema. Un buen criterio para obtener un período de muestreo adecuado consiste en escoger alrededor de diez veces el ancho de banda del sistema. El nivel de agua aguas abajo y la magnitud de apertura de la compuerta aguas arriba fueron uniformemente muestreados cada segundo.

a. Experimento con señal escalón. El objeto de este experimento es obtener una estimación inicial del orden y de los parámetros del modelo que caracterizan el comportamiento dinámico del tramo del canal bajo análisis y luego utilizar estos resultados para diseñar un experimento más informativo donde la apertura de la compuerta siga una señal binaria.

Este experimento consiste en mantener la compuerta aguas abajo en posición fija, a fin de estabilizar la variación del nivel del agua en el tramo, luego aplicar una entrada tipo escalón a la compuerta aguas arriba, midiendo y registrando la evolución de la variación de nivel aguas abajo.

Para este experimento, los datos iniciales de las variables fueron los siguientes: nivel inicial del agua aguas abajo $y_{dvv10} = 34cm$ estado inicial de la compuerta aguas arriba $u_{v10} = 10cm$.

La compuerta aguas arriba recibió un incremento en su magnitud de apertura de 10 cm, correspondiente a un régimen de explotación habitual del canal de riego. Los datos correspondientes a la variación del nivel aguas abajo, así como el incremento de la magnitud de apertura total de la compuerta fueron guardados para su análisis posterior. En la figura 33 se muestra un

esquema del experimento con señal escalón.

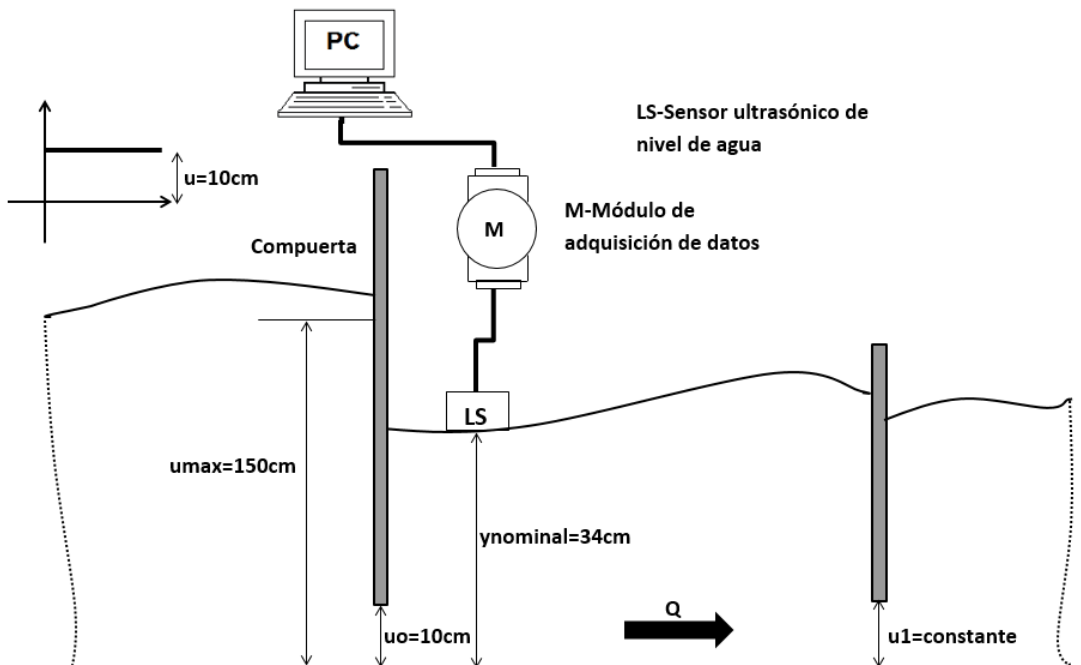


Figura 33: Esquema simplificado del experimento con señal escalón.

Fuente: Elaboración propia

Durante este experimento, la variación del nivel del agua aguas abajo fue de aproximadamente 15 cm. Los resultados obtenidos se almacenaron mediante los vectores u y y en workspace de MATLAB y usando el comando “systemIdentification” se obtuvo la figura 34.

De la figura 34, se aprecia que la respuesta describe un sistema de segundo orden con retardo de tiempo, cuyo comportamiento dinámico se representa mediante la expresión:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Delta y(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d \Delta y(t)}{dt} + \Delta y(t) = K \Delta u(t - \tau) \quad (75)$$

donde K es la ganancia estática, T_1 y T_2 las constantes de tiempo y τ es el retardo de tiempo.

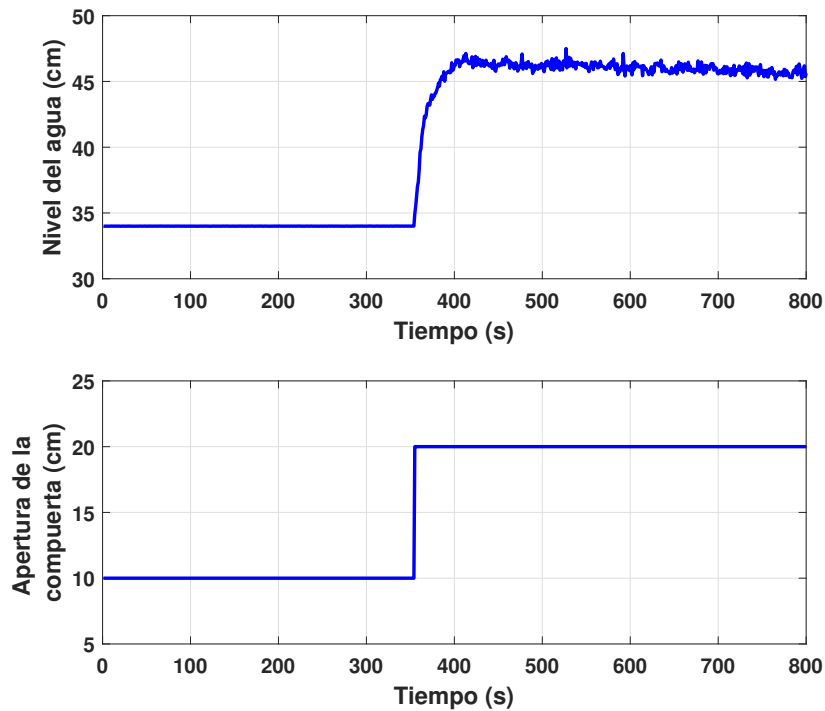


Figura 34: Resultados del experimento con señal escalón en MATLAB.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

La ganancia estática está definida como el cambio total en la salida entre el cambio total en la entrada:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0} \quad (76)$$

La expresión (75) puede ser representada mediante la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s} \quad (77)$$

A partir del procesamiento de los resultados gráficos se obtienen los siguientes valores aproximados para los parámetros de la función de transferencia (77):

- $K = 2,5331$

- $\tau = 10$ s.
- $T_1 = 22,81$ s.
- $T_2 = 0,079358$ s.

El parámetro T_1 constituye la constante de tiempo dominante del sistema y representa la dinámica del tramo del canal y del sensor de nivel, mientras que T_2 representa la dinámica de la compuerta. Con estos resultados se procedió a diseñar el experimento para obtener los datos necesarios y realizar la identificación paramétrica del tramo del canal bajo estudio mediante una señal pseudoaleatoria.

b. Experimento con señal binaria pseudoaleatoria (SBPA).

Entre las propiedades más importantes de la señal de entrada que se utilizará para identificar el sistema está la de “excitación persistente” [28]. Bajo estas circunstancias el proceso, es excitado en distintas frecuencias, lo que permite estimar un modelo que contenga la mayor cantidad de información posible acerca del sistema real. Una señal que posee un espectro suficientemente amplio de frecuencias es la secuencia binaria pseudoaleatoria (SBPA) [1]. Las características de la SBPA tal como amplitud, período y ancho de pulso mínimo y máximo se determinan a partir de información obtenida de experiencias preliminares (experimento con señal escalón), equipos y software disponibles, entre otros. Para obtener datos más precisos para la identificación, el tramo del canal de riego fue excitado con una señal de entrada persistente [28, 39] tipo secuencia binaria de duración pseudoaleatoria, la cual actúa sobre la compuerta aguas arriba del tramo del canal objeto de estudio. La amplitud de la SBPA en este caso se determina de tal forma que abarque la mayor parte de la región lineal. Para ello se realizaron pruebas de apertura de compuerta de $\pm 10\text{cm}$. Esta variación en la magnitud de apertura de la compuerta aguas arriba corresponde con un régimen

4.6.2. Tratamiento previo de los datos.

Los datos registrados pueden tener deficiencias que afecten negativamente el proceso de identificación, por ello es necesario realizar un análisis previo de los mismos antes de ser utilizados [28]. Estas imperfecciones pueden ser:

- Presencia de perturbaciones de alta frecuencia, por encima de las frecuencias de interés en la respuesta del sistema.
- Datos claramente erróneos, producidos por fallos en el hardware o software utilizados en el experimento de almacenamiento de los datos.
- Desviaciones, desplazamientos o perturbaciones de baja frecuencia (niveles de continua).

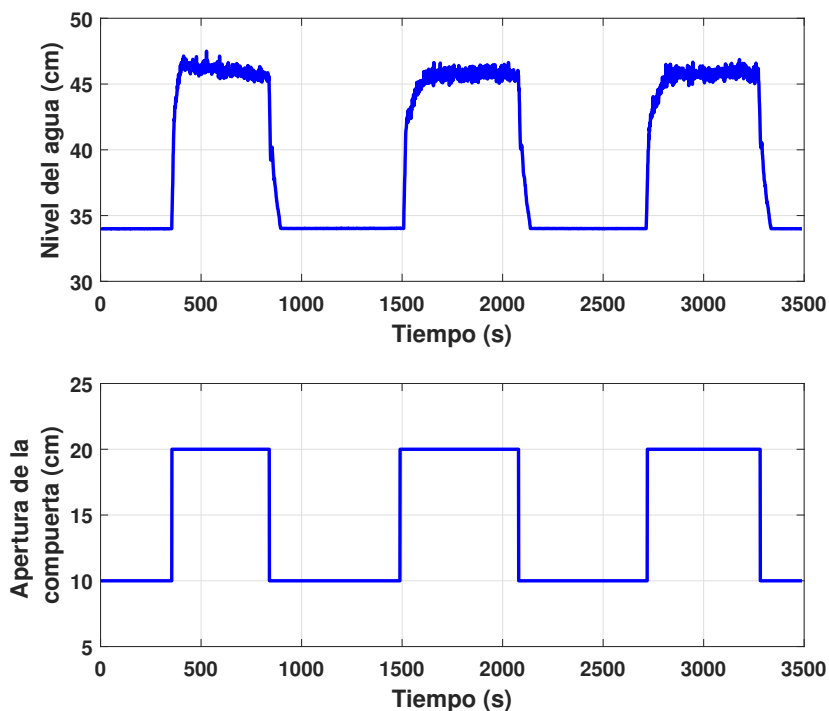


Figura 36: Resultados del experimento con señal SBPA en MATLAB.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Las perturbaciones de alta frecuencia se producen por fuentes de ruido ajenas al sistema y aparecen cuando el período de muestreo es innecesariamente pequeño. En los datos obtenidos a partir del experimento realizado no se aprecia la presencia de estas insuficiencias. Los datos erróneos suelen presentarse de forma aislada por algún tipo de deficiencia en el sistema de adquisición de datos y pueden tener efectos negativos en el proceso de identificación, por lo que es necesario excluirlas. Esto se puede realizar eliminando el dato manualmente y aproximando su nuevo valor mediante interpolación. También existen algoritmos que permiten corregir estos datos de forma automática. En los datos obtenidos a través del experimento con SBPA no se tiene presencia significativa de estos errores.

Las perturbaciones de baja frecuencia, desplazamientos, desviaciones o variaciones periódicas en los datos de entrada-salida, deben ser adecuadamente tratadas. Para eliminar dichas deficiencias (desviaciones y desplazamientos) se aplicó la función `detrend` de Matlab a una parte de los datos obtenidos experimentalmente. Los resultados se muestran en las figuras 37.

Adicionalmente, se realiza una división de los datos disponibles en dos partes o subconjuntos, tal como se muestra en las figuras 38:

- Datos para la estimación N_E . El cual es usado para estimar los parámetros del modelo mediante la solución de un problema de optimización, de tal manera que el vector de parámetros estimados sobre el conjunto de estimación $\hat{\theta}_{NE}$ sea:

$$\hat{\theta}_{NE} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} J_{NE}(\theta, N_E) \quad (78)$$

- Datos para validación N_V . Con este conjunto se evalúa el modelo obtenido mediante un criterio de validación:

$$\hat{F}_{CE} = \hat{J}_{NV}(\hat{\theta}_{NE}, N_V) \quad (79)$$

donde J_{NE} es el criterio de estimación y J_{NV} es el criterio de validación.

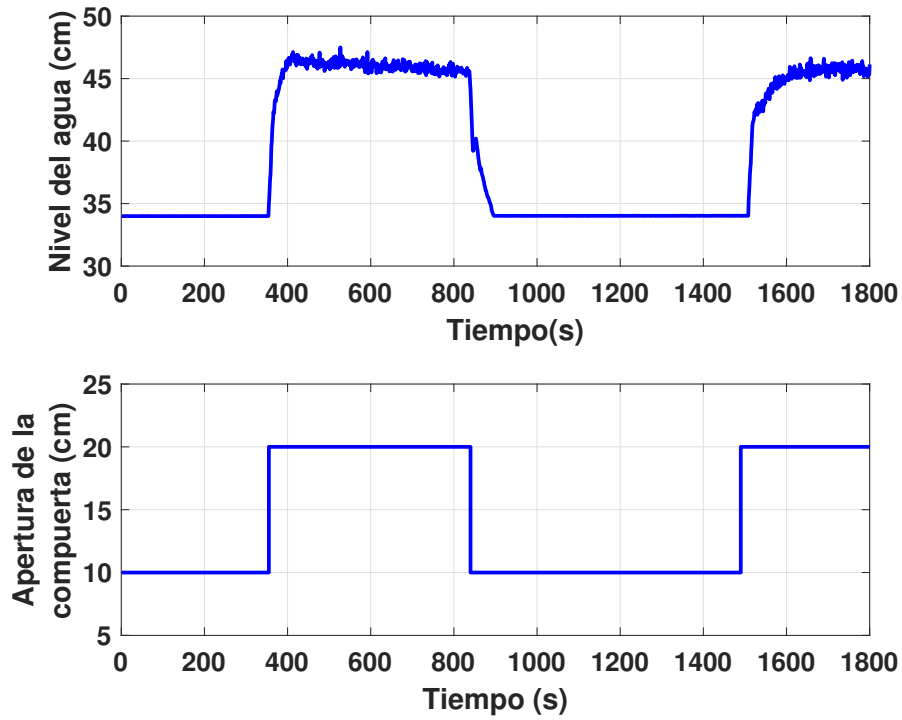


Figura 37: Resultados del tratamiento de datos mediante MATLAB.
 Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

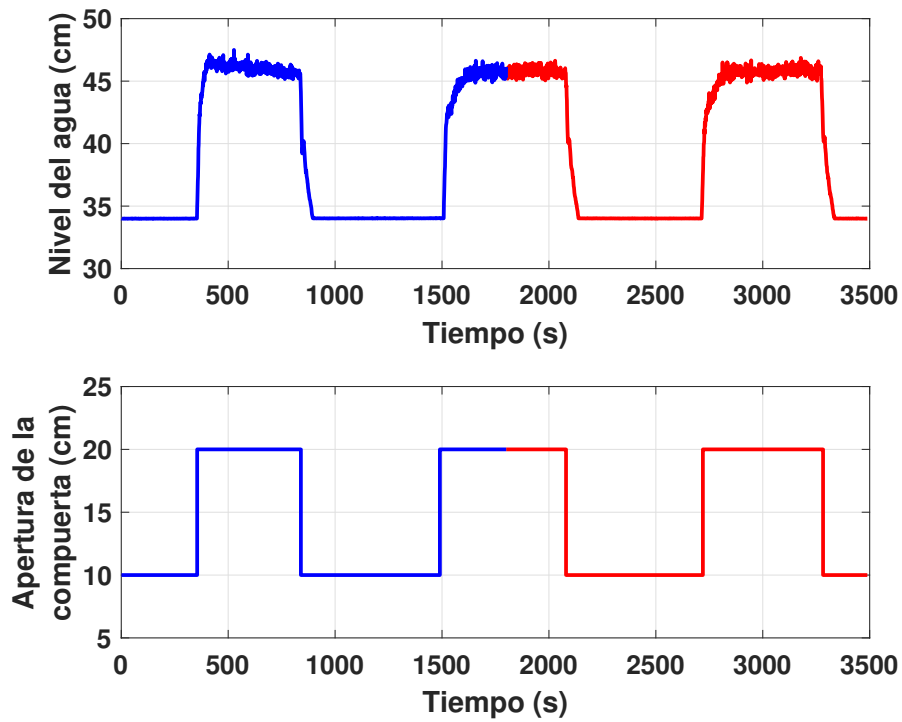


Figura 38: División de datos para la identificación y validación.
 Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

4.6.3. Estimación de los parámetros del modelo del canal de riego

En la estimación de los parámetros resulta necesario incluir el retardo de tiempo del proceso, el cual se obtuvo a partir del experimento con señal escalón. En este caso se determinó un retardo τ de 10 s.

Se procedió a realizar la estimación de parámetros para modelos con diversos ordenes y estructuras ARX, ARMAX y OE utilizando los algoritmos implementados en Matlab. La estructura, los órdenes de los polinomios y el retardo de tiempo de los modelos a ser analizados se muestran en el cuadro 4. Los resultados obtenidos de la estimación de los parámetros para cada uno de los modelos analizados se muestran en los cuadros 5, 6, 7 y 8.

Cuadro 4: Ordenes de los polinomios $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ y $C(q^{-1})$

Estructura	na	nb	nc	nf	d
ARX	1	1	0	0	1
ARX	2	2	0	0	1
ARX	3	3	0	0	1
ARX	4	4	0	0	1
ARMAX	1	1	1	0	1
ARMAX	2	2	2	0	1
ARMAX	3	3	3	0	1
ARMAX	4	4	4	0	1
OE	0	1	0	1	1
OE	0	2	0	2	1
OE	0	3	0	3	1
OE	0	4	0	4	1

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5: Parámetros estimados del polinomio $A(q_1)$ de las estructuras de modelos ARX y ARMAX.

Estructura	a_1	a_2	a_3	a_4
ARX_{111}	-0,9521	0	0	0
ARX_{221}	-0,5534	-0,3925	0	0
ARX_{331}	-0,4612	-0,2576	-0,2201	0
ARX_{441}	-0,4806	-0,2829	-0,2673	0,08581
$ARMAX_{1111}$	-0,9584	0	0	0
$ARMAX_{2221}$	-1,663	0,674	0	0
$ARMAX_{3331}$	-1,069	-0,2379	0,3274	0
$ARMAX_{4441}$	-0,8814	-0,1164	-0,3496	0,3713

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 6: Parámetros estimados del polinomio $B(q^{-1})$ de las estructuras de modelos ARX, ARMAX y OE.

Estructura	b_1	b_2	b_3	b_4
ARX_{111}	0,05598	0	0	0
ARX_{221}	0,07192	-0,00776	0	0
ARX_{331}	0,08212	0,1235	-0,02171	0
ARX_{441}	0,07909	0,009944	0,004816	-0,0282
$ARMAX_{1111}$	0,04947	0	0	0
$ARMAX_{2221}$	0,06862	-0,05568	0	0
$ARMAX_{3331}$	0,07047	-0,02222	-0,02374	0
$ARMAX_{4441}$	0,07657	-0,02204	0,007577	-0,03387
OE_{111}	0,05466	0	0	0
OE_{221}	0,1729	-0,1301	0	0
OE_{331}	0,1609	0,01473	-0,09995	0
OE_{441}	0,1623	-0,1149	-0,151	0,1036

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 7: Parámetros estimados del polinomio $C(q^{-1})$ de la estructura de modelo ARMAX.

Estructura	c_1	c_2	c_3	c_4
$ARMAX_{1111}$	-0,3333	0	0	0
$ARMAX_{2221}$	-1,247	0,5208	0	0
$ARMAX_{3331}$	-0,6231	-0,2182	0,3352	0
$ARMAX_{4441}$	-0,4437	-0,01205	-0,1524	0,2119

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8: Parámetros estimados del polinomio $F(q^{-1})$ de la estructura de modelo OE.

Estructura	f_1	f_2	f_3	f_4
OE_{111}	-0,9537	0	0	0
OE_{221}	-1,123	0,1587	0	0
OE_{331}	-0,2684	-0,8827	0,2146	0
OE_{441}	-1,095	-0,6733	0,7216	0,04697

Fuente: Elaboración propia

4.6.4. Validación del modelo del canal

Para los modelos examinados el cálculo del valor de FPE respectivo, se muestra en la cuadro 9.

A partir del cuadro 9 se observa que en las estructuras ARX y ARMAX, el valor de FPE se estabiliza o varía levemente alrededor de 0.066 para los modelos de segundo orden en adelante, con ello se puede excluir los modelos de primer orden y considerar los de orden superior. Respecto a las estructuras OE no se puede sacar conclusiones debido a que el valor de FPE no se estabiliza.

Cuadro 9: Valores del error final de predicción (FPE) para los modelos estimados.

Estructura	[na nb nc nf d]	FPE
ARX	[1 1 0 0 1]	0,08632
ARX	[2 2 0 0 1]	0,07243
ARX	[3 3 0 0 1]	0,06861
ARX	[4 4 0 0 1]	0,0645
ARMAX	[1 1 1 0 1]	0,07206
ARMAX	[2 2 2 0 1]	0,06625
ARMAX	[3 3 3 0 1]	0,06614
ARMAX	[4 4 4 0 1]	0,06596
OE	[0 1 0 1 1]	0,6428
OE	[0 2 0 2 1]	0,8
OE	[0 3 0 3 1]	0,8096
OE	[0 4 0 4 1]	0,8137

Fuente: Elaboración propia

Otro método utilizado para verificar el orden de los parámetros de las estructuras de modelos estimados, es la evaluación de polos y ceros. Si el orden del modelo es s y es superior al orden del proceso real n , se originan pares de polos-ceros muy próximos que pueden ser cancelados. En este caso se dice que el sistema está sobredimensionado y se puede reducir. La localización de polos y ceros de los modelos ARX, ARMAX y OE de segundo, tercer y cuarto orden con los datos del canal viejo imperial, se muestran de las Figuras 39 a la 47.

Como resultado de este análisis se puede apreciar que los modelos ARX, ARMAX y OE de 3 y 4 orden presentan cancelación de polos y ceros, por lo que se las puede excluir. Lo cual simplifica el análisis a los modelos de segundo orden.

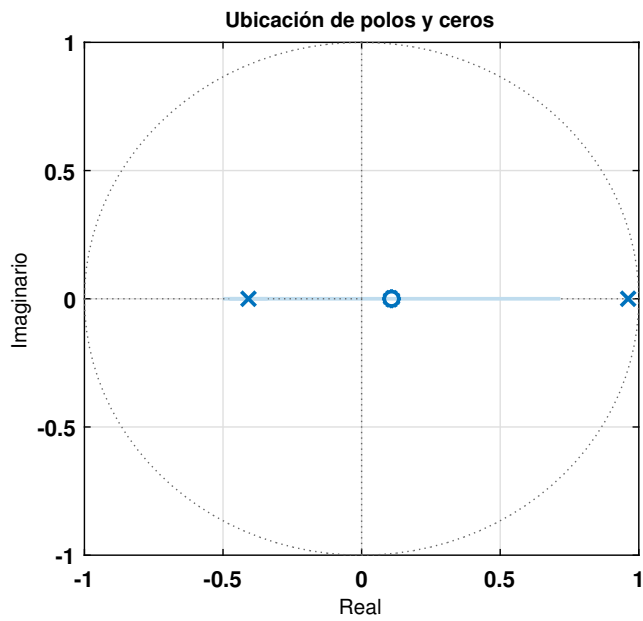


Figura 39: ARX de orden $n_a = n_b = 2$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

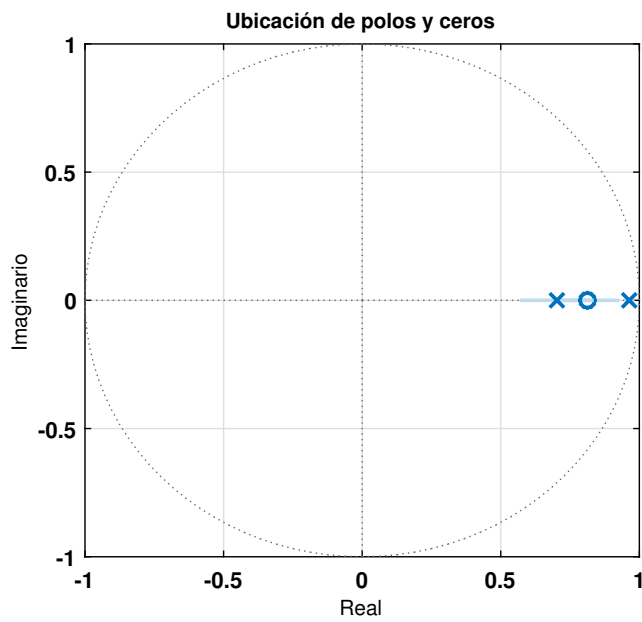


Figura 40: ARMAX de orden $n_a = n_b = n_c = 2$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

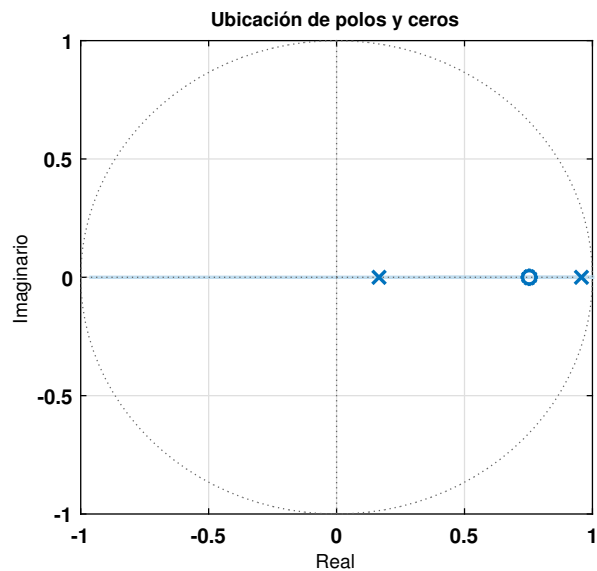


Figura 41: OE de orden $n_b = n_f = 2$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

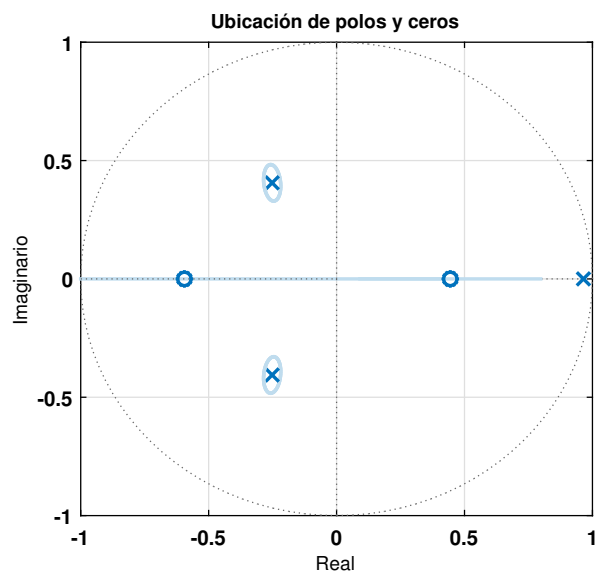


Figura 42: ARX de orden $n_a = n_b = 3$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

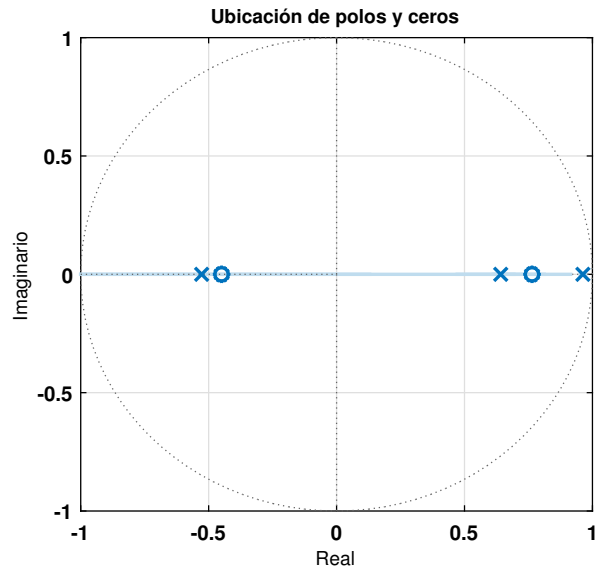


Figura 43: ARMAX de orden $n_a = n_b = n_c = 3$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

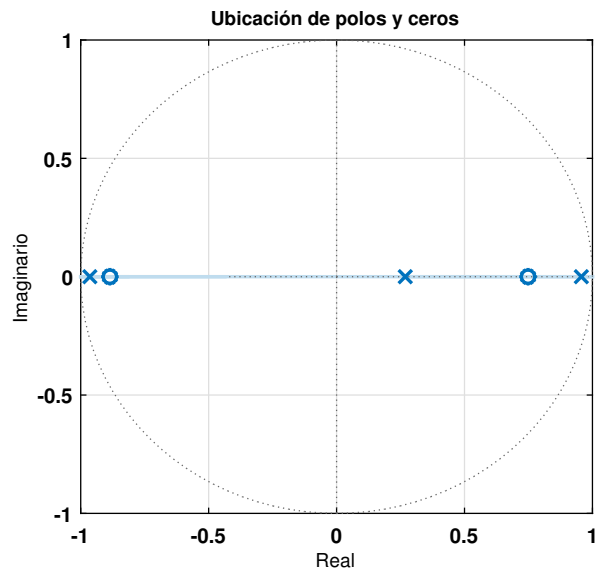


Figura 44: OE de orden $n_b = n_f = 3$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

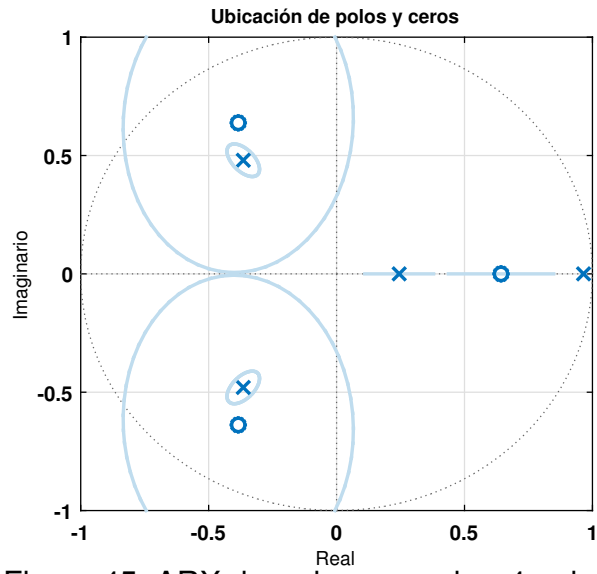


Figura 45: ARX de orden $n_a = n_b = 4$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

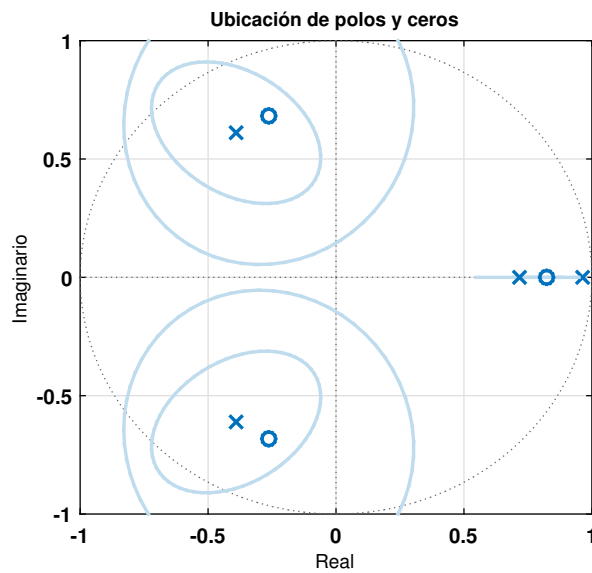


Figura 46: ARMAX de orden $n_a = n_b = n_c = 4$ y $d = 1$.
Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

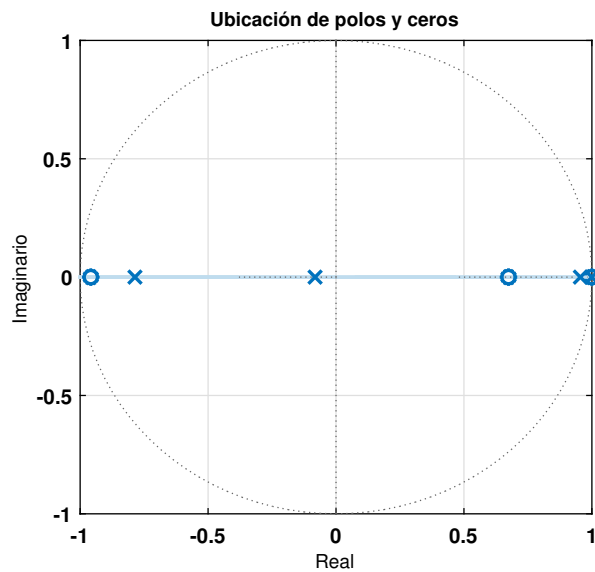


Figura 47: OE de orden $nb = nf = 4$ y $d = 1$.
 Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Una vez verificado el orden de los modelos, se procedió a realizar el procedimiento de validación cruzada. Este procedimiento consiste en comparar gráficamente la respuesta del modelo matemático obtenido y la respuesta del sistema real. Para ello se hace uso del conjunto de datos experimentales reservados para validación N_V . Se trata de comprobar si el modelo es capaz de reproducir los datos de salida para entradas que no se han utilizado en la estimación. Para aplicar este proceso de validación se utiliza la función `compare`, implementada en Matlab. Los resultados del procedimiento de validación cruzada se muestran en las figuras 48 - 50.

A partir de las figuras 48, 49 y 50, se observa que las salidas de los tres modelos se aproximan con cierta precisión a los datos adquiridos experimentalmente del tramo del canal de riego. En este caso se puede cuantificar esta aproximación mediante un índice de ajuste. Matlab utiliza la expresión (80) para

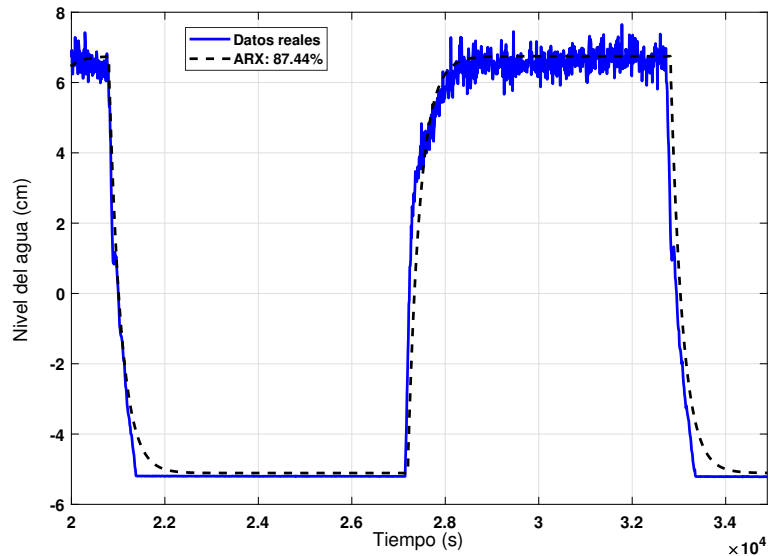


Figura 48: Resultados de validación cruzada del modelo con estructura ARX [2 2 1].

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

determinar este índice:

$$FIT = \left(1 - \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y - \bar{y}\|}\right) \times 100 \% \quad (80)$$

donde y es la salida medida, \hat{y} es la salida estimada.

El valor calculado corresponde a la variación de la salida estimada, mediante el modelo matemático, con respecto a la salida real del proceso. Los valores cercanos al 100% significan una mejor aproximación y por consiguiente un mejor modelo. En el cuadro 10, se detallan los valores del índice de ajuste FIT determinados para los modelos analizados.

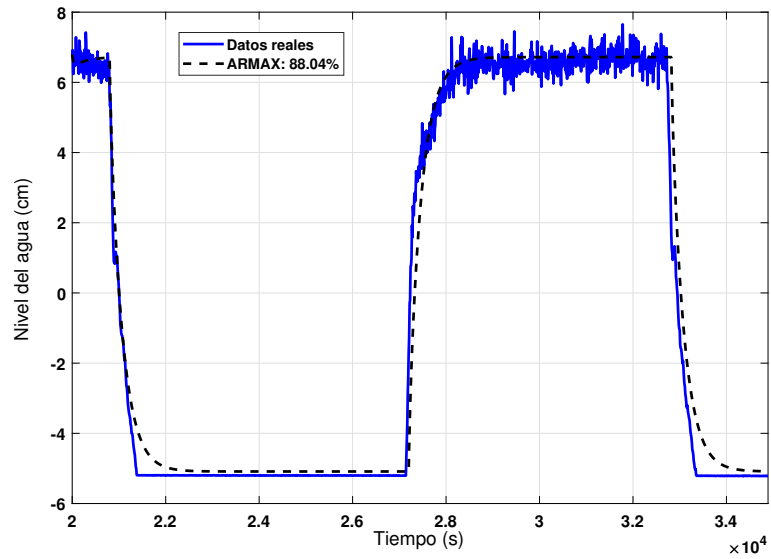


Figura 49: Resultados de validación cruzada del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1].

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

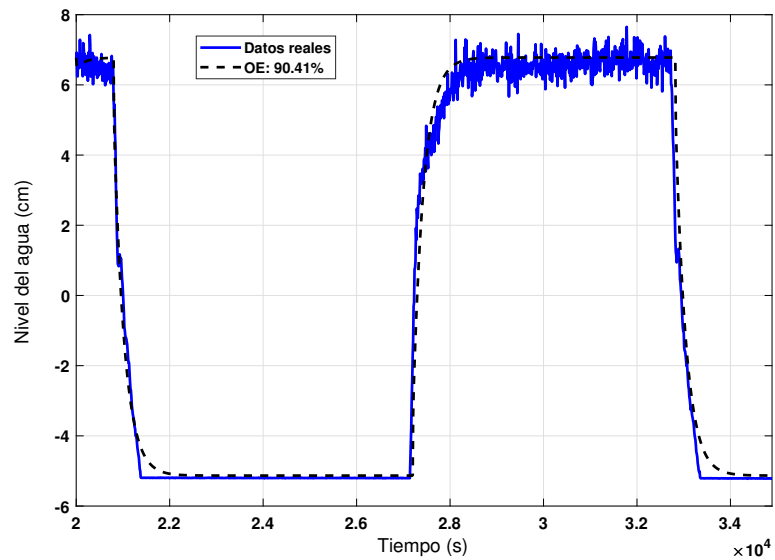


Figura 50: Resultados de validación cruzada del modelo con estructura OE [2 2 1].

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Cuadro 10: Índice de ajuste FIT de los modelos estimados.

Estructura	[na nb nc nf]	d	FIT
ARX	[2 2 0 0]	1	87,44 %
ARMAX	[2 2 2 0]	1	88,04 %
OE	[0 2 0 2]	1	90,44 %

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 10, se puede observar que el modelo con estructura OE es el que tiene mejor índice de ajuste, aproximadamente 4% por arriba del modelo ARX y 2,4% del modelo ARMAX.

Finalmente, se realizó una validación de modelos utilizando análisis de residuos del modelo resultante. Dado que se asume, que un proceso de identificación bien condicionado arroja una secuencia de residuos similar al ruido blanco, una buena forma de verificar esta condición consiste en aplicar un análisis por autocorrelación [36]:

$$R_{\epsilon}^N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \epsilon(k)\epsilon(k - \tau k) \quad (81)$$

para diferentes valores de $\sigma = 1, 2, 3, 4, \dots$

Dado que una de las características del ruido blanco es la carencia de periodicidad, la autocorrelación de una señal de ruido blanco tendrá un fuerte pico en $\tau = 0$ valores cercanos a cero y sin ninguna estructura periódica para cualquier otro valor de τ . Por ello si la autocorrelación de la función de error no da valores pequeños para $\tau \neq 0$ significa deficiencias en la estimación de los parámetros del modelo [36]. De forma similar, los residuos no deben estar correlacionados con la señal de entrada. Por ello una buena práctica consiste en determinar aplicar la correlación cruzada entre los residuos de la salida y la señal de entrada del

sistema objeto de estudio. Esta correlación se determina mediante la expresión:

$$R_{\epsilon u}^N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \epsilon(k)\epsilon(k - \tau k) \quad (82)$$

El modelo será tanto más exacto cuanto más se acerquen a cero los términos de la ecuación 82. Si se detectan trazas de entradas pasadas en los residuos, entonces una parte de la salida está asociada con valores pasados de la entrada, lo que indica que el modelo puede mejorarse [36]. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 51.

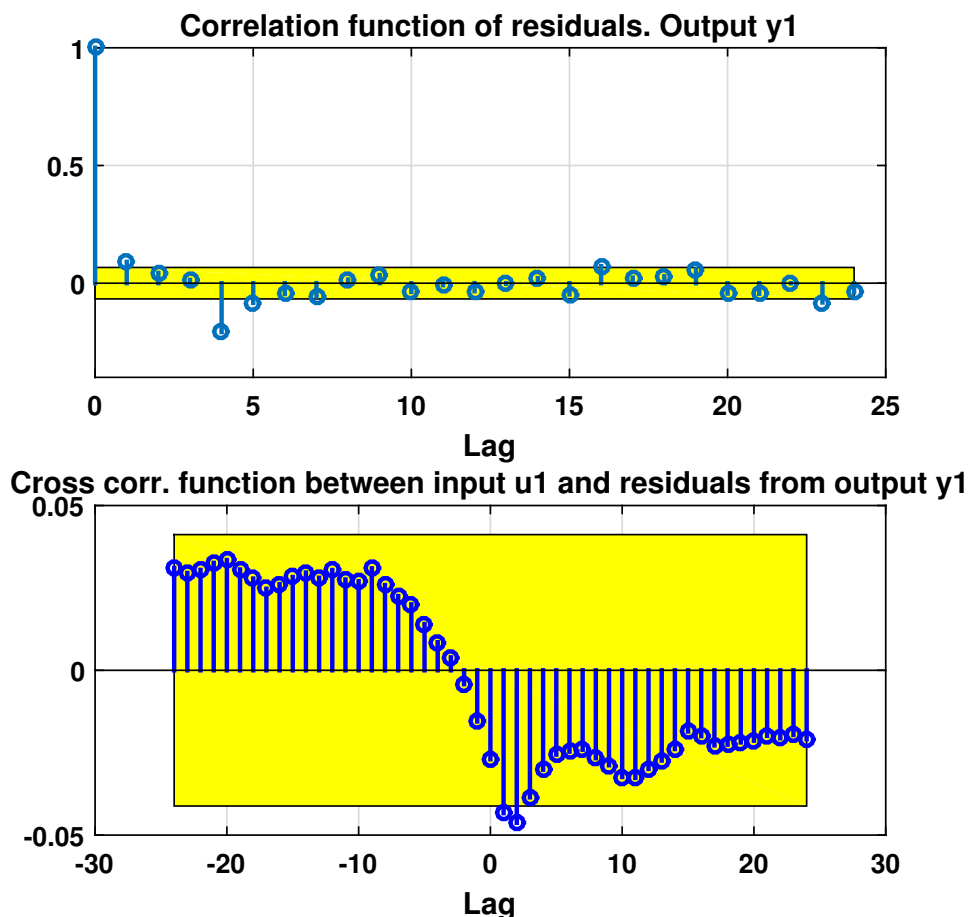


Figura 51: Resultados del análisis de residuos del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1]

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Del análisis de autocorrelación realizado al modelo con estructura ARMAX, se puede apreciar que los errores residuales no están correlacionados entre sí (en un intervalo de confianza del 99 %) y tampoco están correlacionados con la entrada de la planta. Puesto que la correlación no sale del margen de validez, se concluye que la dinámica del tramo de canal de riego se encuentra suficientemente caracterizada con el modelo escogido. A partir de los resultados obtenidos del proceso de validación de modelo, se establece que el modelo lineal, discreto, con estructura ARMAX de segundo orden y con retardo de tiempo de 10 s reproduce con suficiente exactitud el comportamiento dinámico del canal de riego. Por ello puede ser utilizado en el diseño del controlador predictivo que se pretende desarrollar en este trabajo. En las Figuras 52, 53 y 54 se muestran las principales características del modelo obtenido.

De la Figura 54 se puede apreciar que el modelo obtenido es estable, posee una pequeña ganancia de estado estacionario (aproximadamente 0.075) y un retardo de tiempo de 10 s. Los parámetros estimados del modelo con estructura ARMAX obtenido se muestran en el cuadro 11.

Cuadro 11: Parámetros estimados del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1].

ARMAX	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
	-1,6636	0,674	0,06862	-0,05568	-1,247	0,5208

Fuente: Elaboración propia

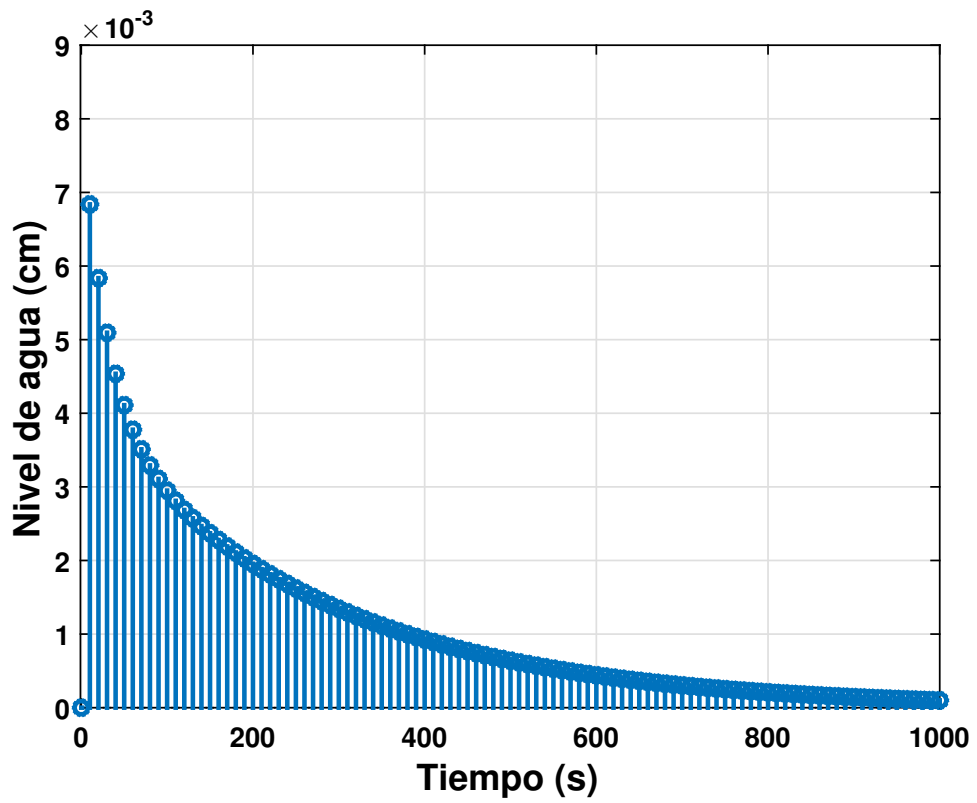


Figura 52: Respuesta impulso del modelo con estructura ARMAX[2 2 2 1]
 Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

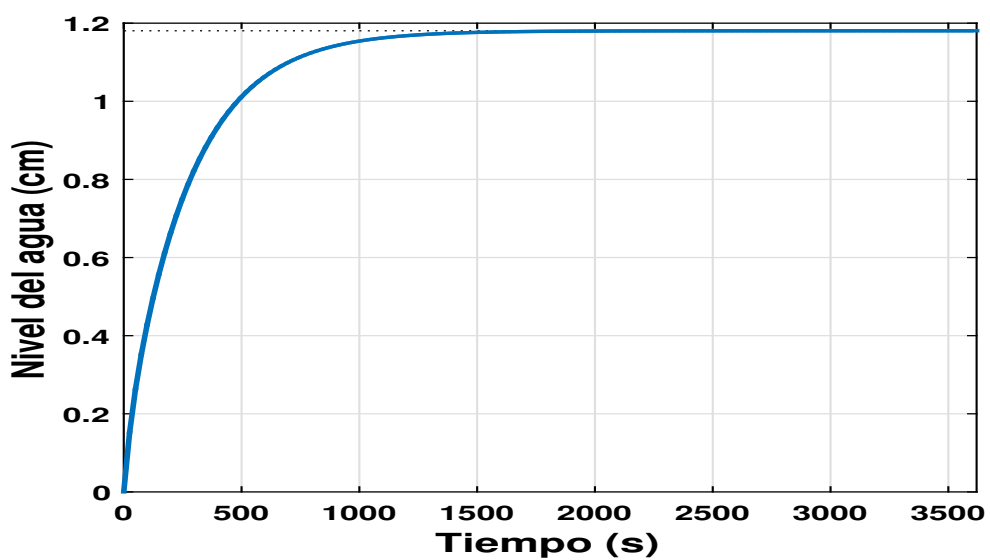


Figura 53: Respuesta escalón del modelo con estructura ARMAX [2 2 2 1]
 Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

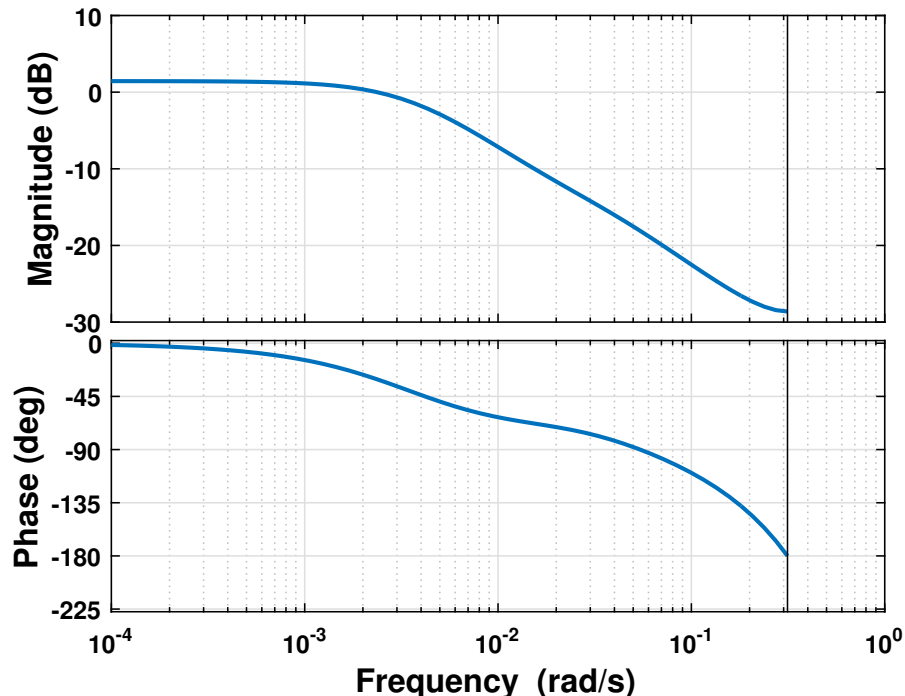


Figura 54: Diagrama de Bode del modelo con estructura ARMAX[2 2 2 1]

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

4.6.5. Implementación del sistema GPC desarrollado en MATLAB-SIMULINK

Como se puede apreciar iniciamos con la introducción de los polinomios de la estructura del modelo, horizontes de predicción, horizonte de control y el tiempo de muestreo. Estos parámetros se utilizan para calcular las matrices E, F, G, G', K', en base a las cuales se determinan las predicciones. La ecuación de predicción y la trayectoria de referencia se utilizan para obtener la función de coste, en la cual se consideran los parámetros de ajuste $\delta(t)$ y $\lambda(j)$. A partir de esta función se calcula la señal de control, sin considerar restricciones. Por último la señal de control (primer elemento del vector) se aplica al proceso.

La implementación del algoritmo GPC en Simulink se presenta en la Figura 55 y se realiza de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 3.

La trayectoria de referencia se obtiene mediante (25). La implementación se muestra en la Figura 57. En cada instante de tiempo se genera la trayectoria de referencia para los N pasos del horizonte de predicción, formando el vector $W(k)$.

La parte principal del generador de trayectoria de referencia se basa en una función desarrollada en Matlab `trayref.m`, la cual a través de las ecuaciones (24) y (25) calcula los valores de $W(k)$ y los acumula en el vector $W(k)$, siendo $k = 1, 2, \dots, N$. Como se puede apreciar de la Figura 56, a dicha función ingresan $y(k)$, la cual en la primera iteración sirve como valor inicial $W(0)$, los valores de α N y $r(k)$ (referencia externa) necesarios para los cálculos. La minimización de la función de coste J sin restricciones se obtuvo mediante (65), (66), y (67). A partir de estas ecuaciones se define:

$$K = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T. \quad (83)$$

Para obtener la señal de control se emplea la primera fila de la matriz K (K_{prima}), tal como se mostro en el epígrafe anterior:

$$K_{prima} = [1 \quad 0_{1,N-1}] K \quad (84)$$

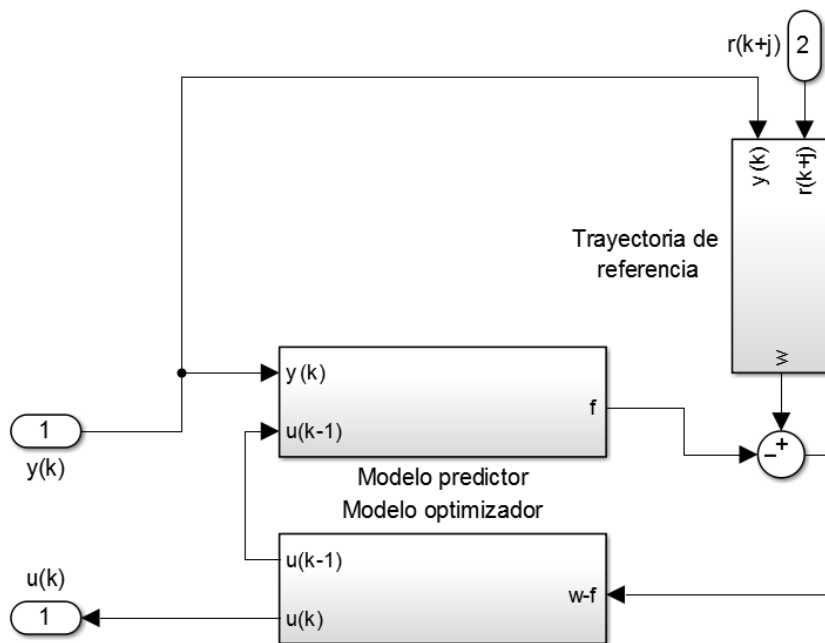


Figura 55: Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del GPC.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

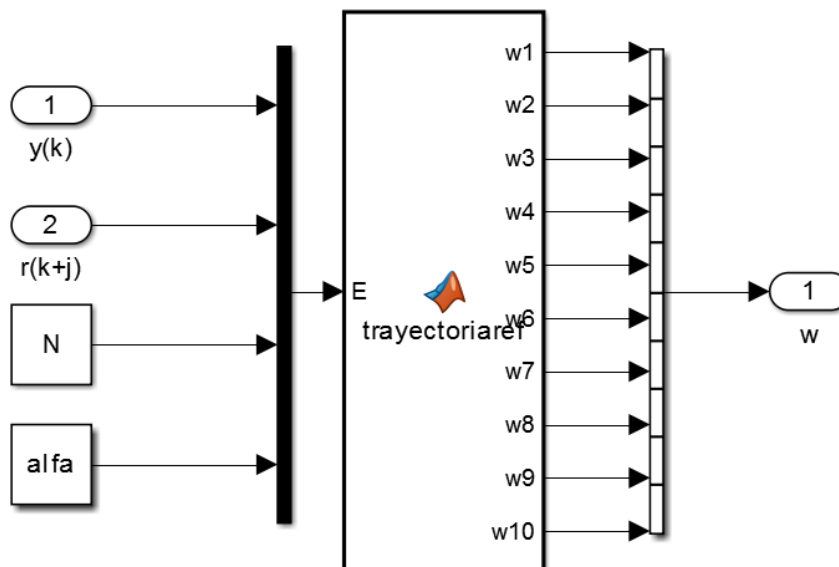


Figura 56: Diagrama en bloques de la implementación en Simulink de la trayectoria de referencia.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Por lo que se tiene:

$$\Delta u(k) = Kprima(w - f). \quad (85)$$

A partir de la expresión (85) se implementa el optimizador. Como se observa es necesario ingresar los errores futuros $w - f$ para multiplicarlos por la matriz $Kprima$, la cual se obtiene a partir de la resolución de las ecuaciones diofánticas (44) y (52). La respuesta de este bloque es $u(k)$, que resulta de sumar $\Delta u(k)$ y $u(k - 1)$. La implementación se muestra en la Figura 57. Se utiliza el bloque Memory, el cual es utilizado para inicializar las operaciones.

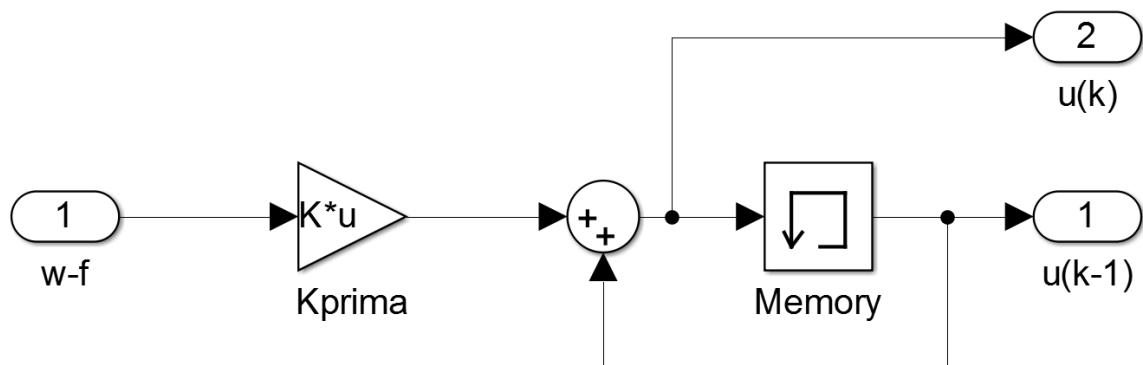


Figura 57: Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del optimizador.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Como elemento final del bloque controlador se tiene el sub-sistema destinado a generar las salidas predichas utilizando el modelo de la planta junto a las salidas y entradas pasadas (ver Figura 58). Mediante este bloque se implementa la ecuación:

$$f = \frac{G'(q^{-1})}{C(q^{-1})} \Delta u(k - 1) + \frac{F(q^{-1})}{y(k)} \quad (86)$$

Es necesario acumular adecuadamente los valores de $\Delta u(k - 1)$ y $y(k)$ para poder realizar las operaciones.

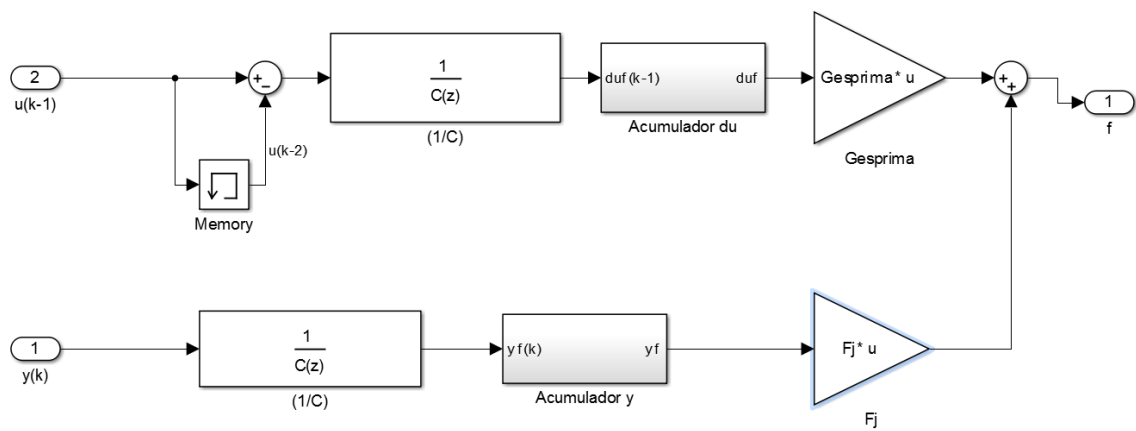


Figura 58: Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del modelo predictor.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

En el diagrama del predictor, se pueden apreciar dos bloques denominados Acumulador du y Acumulador y . Sus funciones son similares y su implementación se muestra en la Figura 59. Estos bloques permiten acumular valores pasados de una secuencia determinada, utilizando la siguiente ecuación:

$$m(k+1) = Am(k) + bp(k) \quad (87)$$

donde $p(k)$ es el valor de la variable que se desea acumular, $m(k)$ es un vector con los valores pasados de $p(k)$, A es una matriz identidad con su diagonal desplazada una posición hacia abajo de dimensión $N \times N$ y b es un vector de acoplamiento, que contiene ceros excepto en la primera posición que contiene a $p(k)$ y cuya dimensión es $N \times 1$. Se tiene además el bloque memory, el cual se utiliza para inicializar las operaciones.

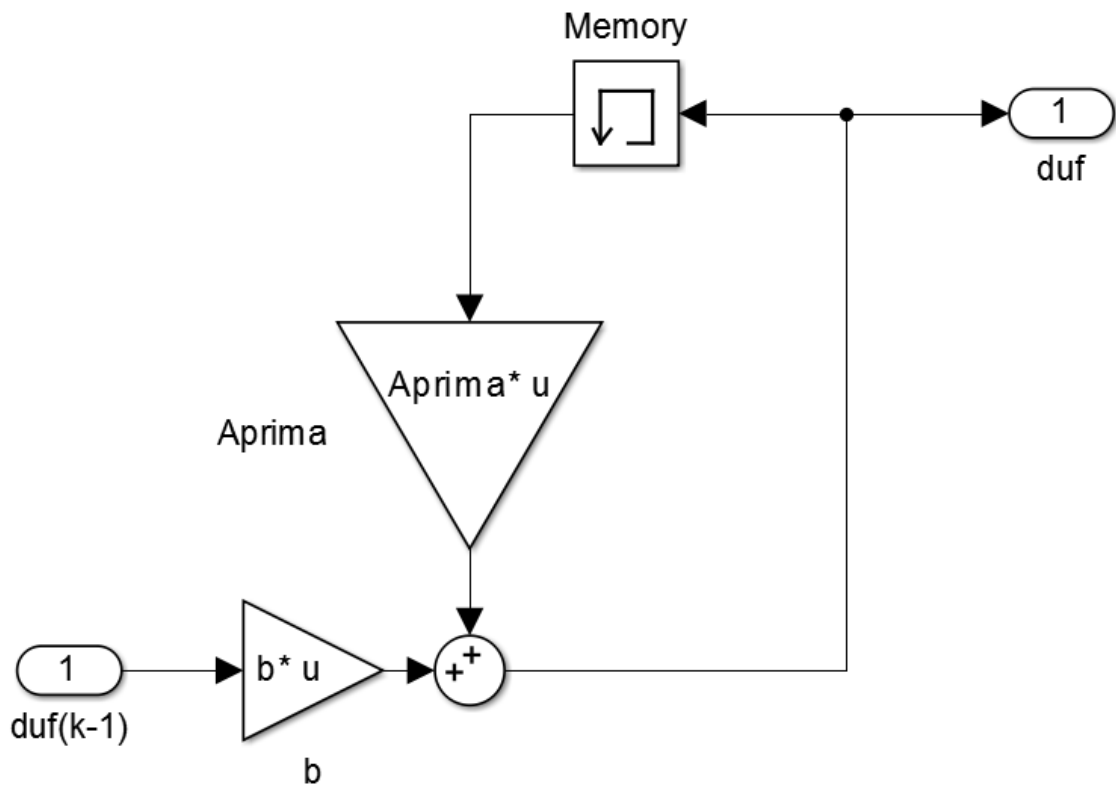


Figura 59: Diagrama en bloques de la implementación en Simulink de los bloques Acumulador mostrados en la Fig.58

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Desarrollado el bloque controlador se procede a construir el modelo de la planta. Para ello se diseña y configura el sub-sistema mostrado en la Figura 60. El modelo de la planta posee estructura ARMAX, este tipo de modelo cuenta con dos funciones transferenciales. La primera modela el comportamiento dinámico de la salida ante una variación en la entrada y la segunda modela el comportamiento de la salida ante perturbaciones.

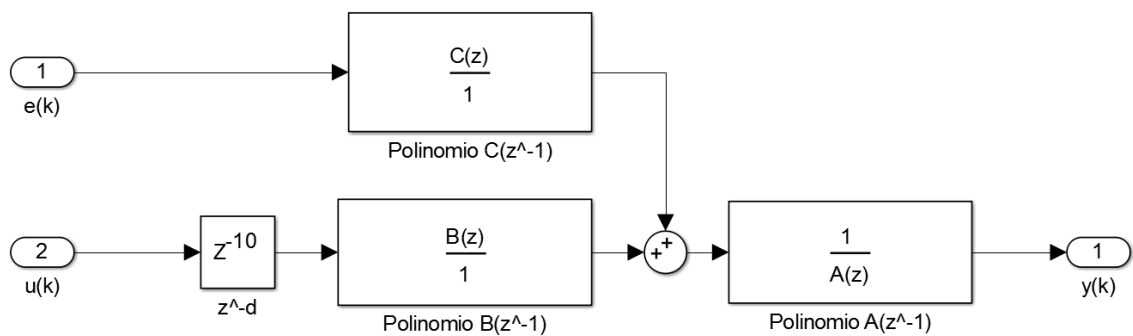


Figura 60: Diagrama en bloques del modelo del proceso objeto de estudio.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

La implementación en Simulink del sistema de control con controlador GPC desarrollado se muestra en la Figura 61.

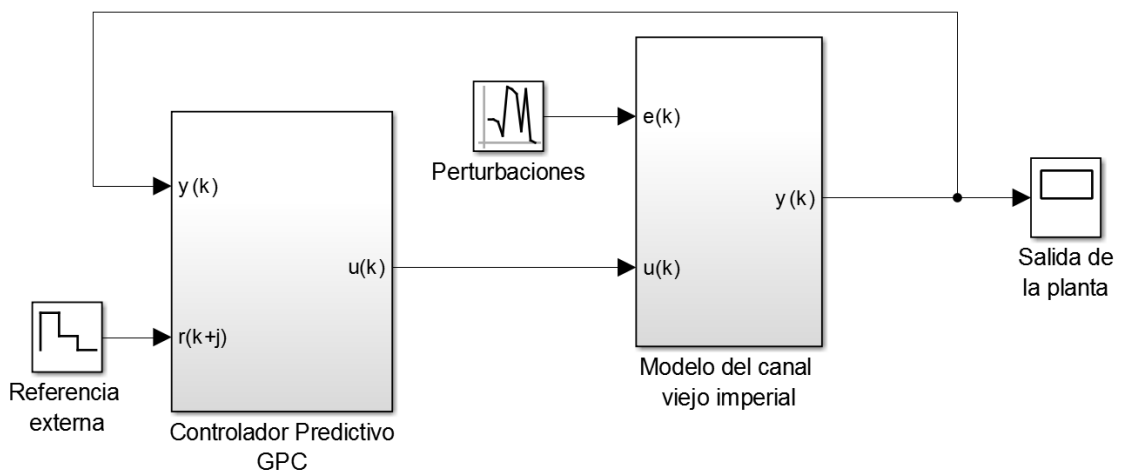


Figura 61: Diagrama en bloques de la implementación en Simulink del sistema de control con controlador GPC del tramo de canal de riego objeto de estudio.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

La simulación de las perturbaciones se realiza con un bloque de valores aleatorios. La señal de referencia externa se construye por medio de bloques generadores de señales que permiten generar trayectorias variables y crear referencias en forma de pulsos. La configuración de los parámetros para realizar la simulación en Simulink del controlador GPC diseñado se muestra en la Figura 62.

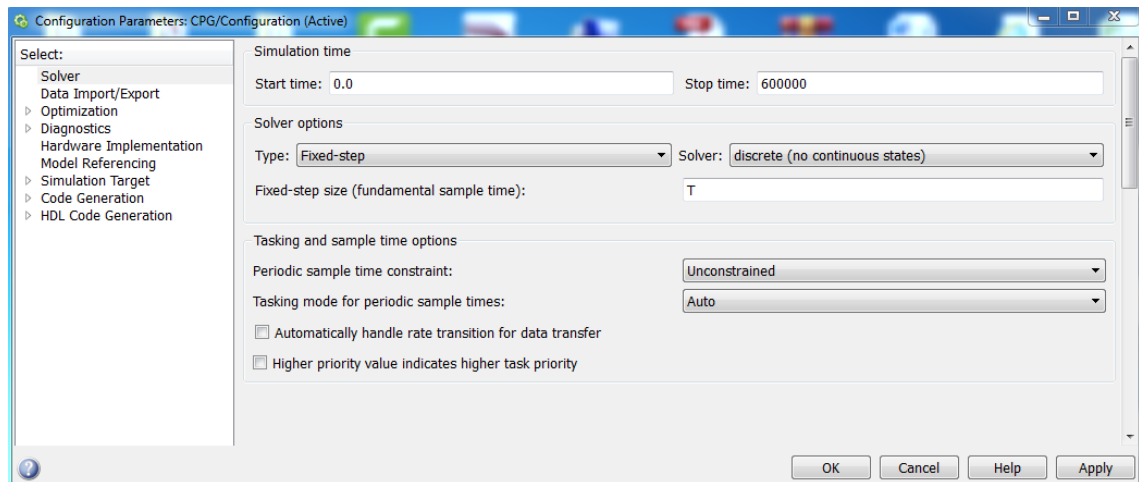


Figura 62: Configuración de los parámetros de simulación de Simulink.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Modelo matemático del comportamiento dinámico de un tramo del canal viejo imperial

Mediante el modelo paramétrico ARMAX[2 2 2 1] se obtuvieron los siguientes polinomios:

$$\begin{aligned}A(q^{-1}) &= 1 - 1,6636q^{-1} + 0,674q^{-2} \\B(q^{-1}) &= 0,06862q^{-1} - 0,05568q^{-2} \\C(q^{-1}) &= 1 - 1,247q^{-1} + 0,5208q^{-2}\end{aligned}\tag{88}$$

Reemplazando estos polinomios en la ecuación 4 se obtiene el modelo resultante en tiempo discreto:

$$\begin{aligned}y(k) &= 1,6636y(k-1) - 0,674y(k-2) + 0,06862u(k-2) \\&\quad - 0,5568u(k-3) - \xi(k) - 1,247\xi(k-1) + 0,5208\xi(k-2)\end{aligned}\tag{89}$$

El modelo en el dominio discreto (89), puede ser representado en el dominio continuo mediante las siguientes funciones de transferencia:

$$G_u(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{2,4155}{(0,000001s + 1)(0,81774s + 1)}e^{-10s};\tag{90}$$

$$G_v(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta v(s)} = \frac{0,5942s^2 + 0,08845s + 0,0005785}{s^2 + 0,08174s + 0,0002346};\tag{91}$$

donde $G_u(s)$ es la función de transferencia que describe el comportamiento dinámico del canal debido a la acción de la variación de la señal de control $\Delta u(s)$; $G_v(s)$, la función de transferencia que describe el comportamiento dinámico del

canal debido al efecto de las perturbaciones $\Delta v(s)$.

Los resultados obtenidos mediante el experimento con SBPA corroboran los obtenidos mediante señal escalón en cuanto a orden y magnitud del retardo de tiempo del modelo final. Sin embargo los parámetros de las expresiones (77) y (90) difieren, lo cual se debe a que los parámetros de la función transferencial (77) se aproximaron gráficamente a partir de los resultados de la respuesta con señal escalón. Los datos del experimento con SBPA contienen información más exacta sobre el comportamiento dinámico del proceso.

5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Simulación del GPC desarrollado.

El primer paso para la simulación del sistema de control predictivo desarrollado consiste en ajustar los horizontes de predicción y los factores de ponderación. El controlador GPC se implementa considerando: referencia externa $r = 10$ cm, con el horizonte de control $N = 10$ y horizonte de predicción $N_1 = 2$ y $N_2 = 11$. El factor de ponderación $\delta(j)$ se considera igual a 1 por [7]. Se tomarán varios valores del factor de ponderación $\lambda(j)$ y α para de esta forma evaluar el efecto de estos parámetros en el desempeño del controlador. No se incluyen los efectos de las perturbaciones en estas simulaciones. En el cuadro 12 se ofrecen los valores de α , $\lambda(j)$ propuestos para evaluar el desempeño del GPC.

Cuadro 12: Parámetros utilizados para las pruebas de simulación.

Simulación	α	$\lambda(j)$
1	0.9	0.35
2	0.9	1000
3	0.1	100
4	0.1	1000

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de simulación del sistema de control predictivo diseñado se muestran en las Fig. 63-Fig. 70

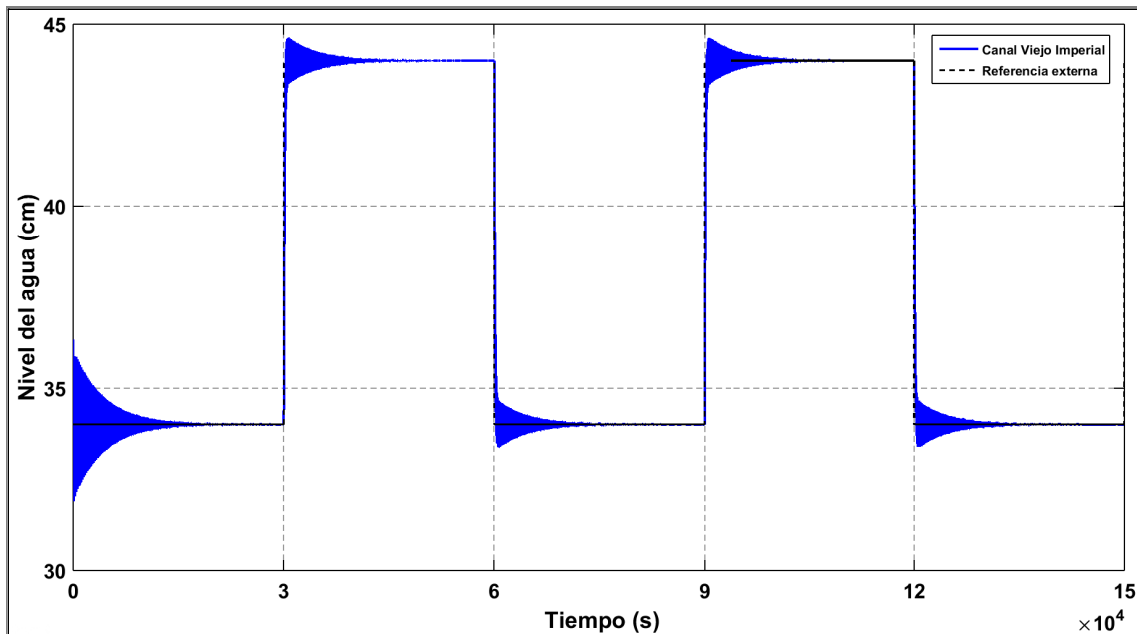


Figura 63: Resultados de la simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 0.35$

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Como se observa de las Fig. 63 y Fig. 64 tanto la salida del sistema como la señal de control presentan variaciones muy bruscas.

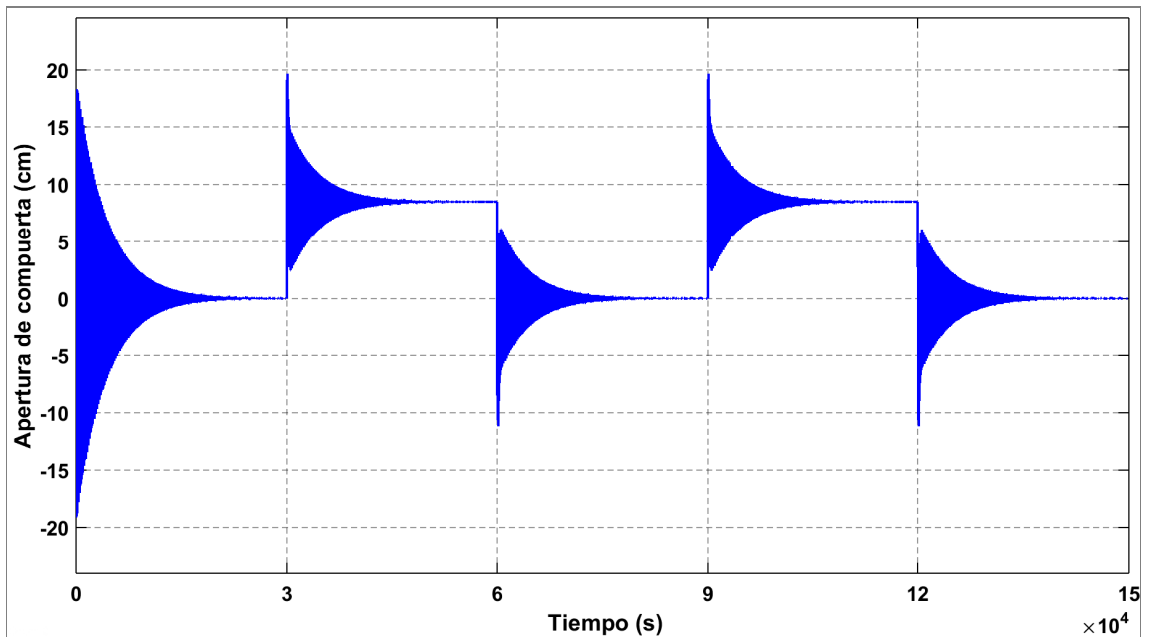


Figura 64: Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 0.35$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

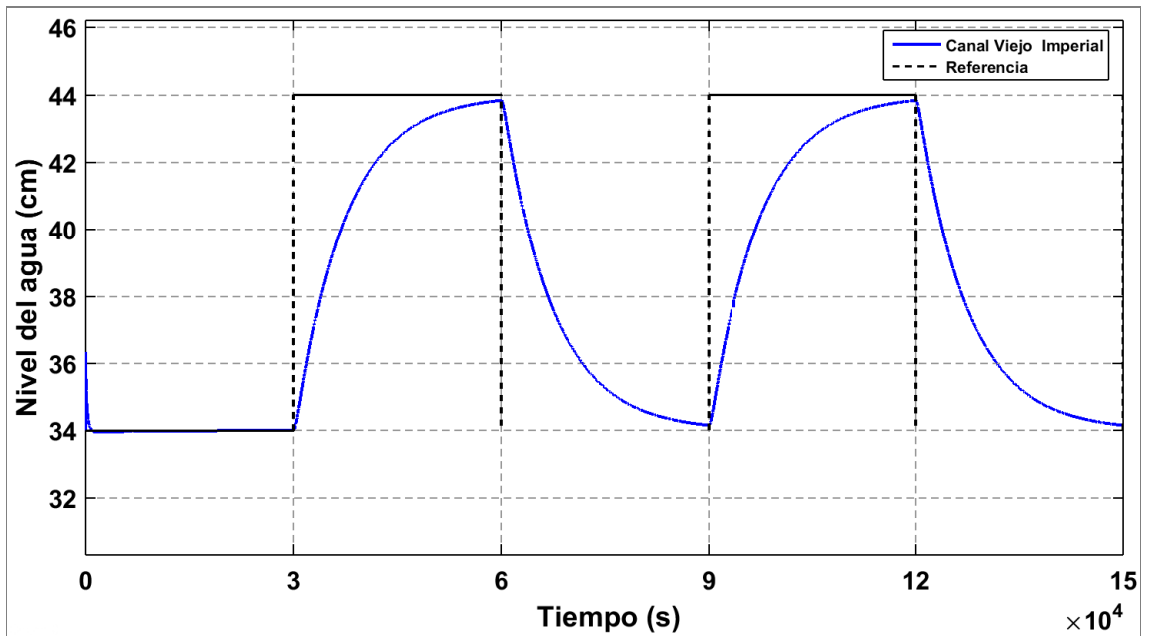


Figura 65: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 1000$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

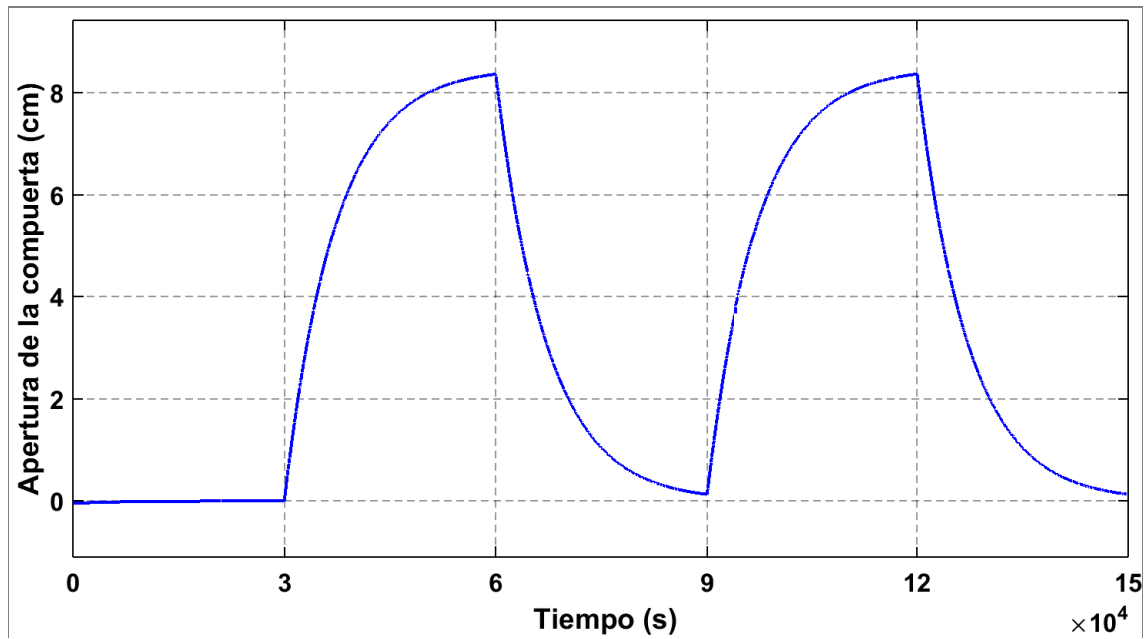


Figura 66: Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 1000$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

De las Fig. 65 y Fig. 66 se observa que la respuesta del sistema es muy lenta y señal de control no presenta variaciones bruscas.

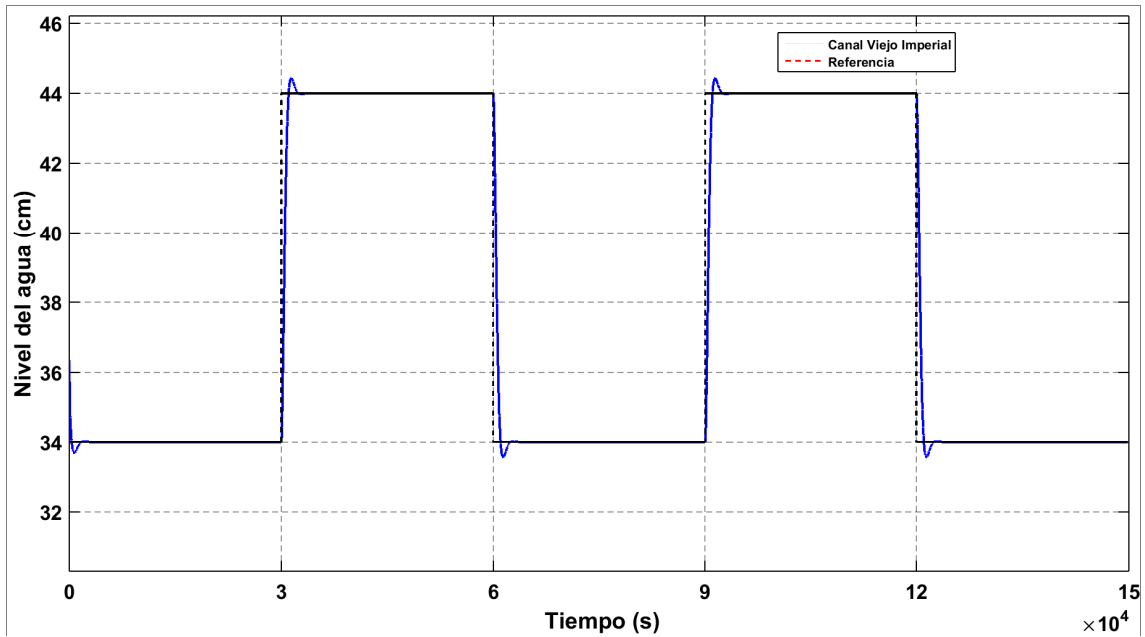


Figura 67: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 100$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

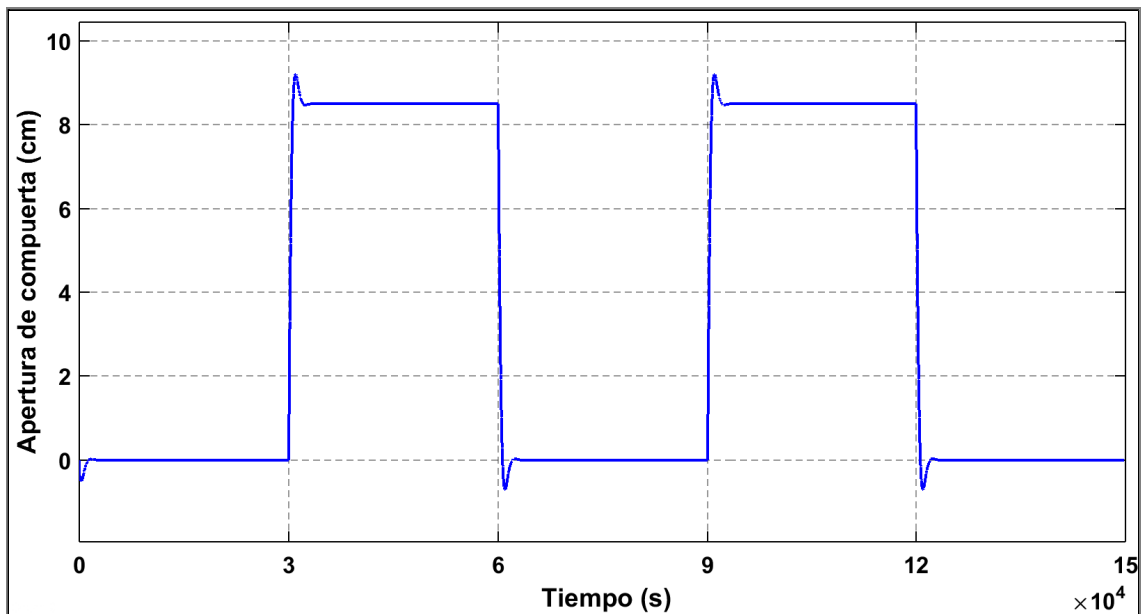


Figura 68: Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 100$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

De las Fig. 67 y 68 se observa que tanto la respuesta del sistema como la señal de control no presentan variaciones bruscas.

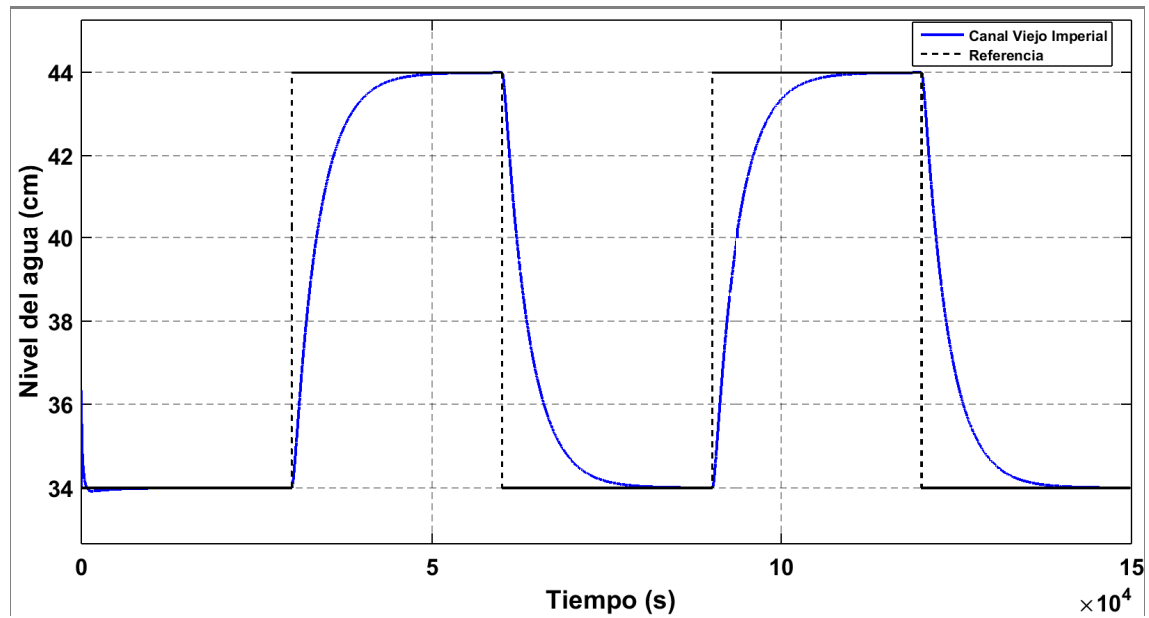


Figura 69: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 1000$

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

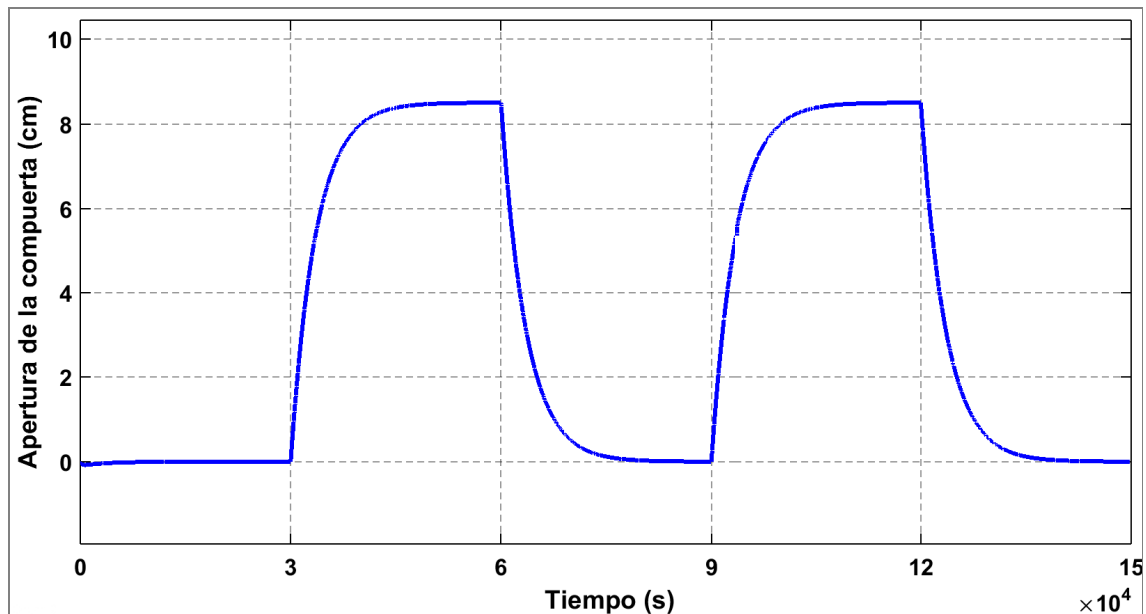


Figura 70: Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.1$ y $\lambda(j) = 1000$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

Igualmente de las Fig. 69 y Fig. 70 se observa que la respuesta del sistema y la señal de control no presentan variaciones bruscas.

De los resultados de simulación obtenidos se concluye que para valores pequeños de λ el sistema alcanza el nivel de referencia más rápido, pero con un mayor esfuerzo de control. A medida que aumenta λ , el sistema tarda más en alcanzar la referencia externa y el esfuerzo de control disminuye.

Se logró obtener una respuesta aceptable con una señal de control suave ($\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$). Los resultados de simulación se muestran en las Fig. 71 y Fig. 72.

Como se puede apreciar con los nuevos valores de α y $\lambda(j)$ la respuesta del sistema es aceptable y la evolución de la señal de control no presenta variaciones bruscas.

Para apreciar el efecto de la varianza de la secuencia aleatoria del modelo de perturbaciones en la respuesta del sistema, se realizan pruebas con valores de

varianza de 0.01, 0.1, 1 y 2.

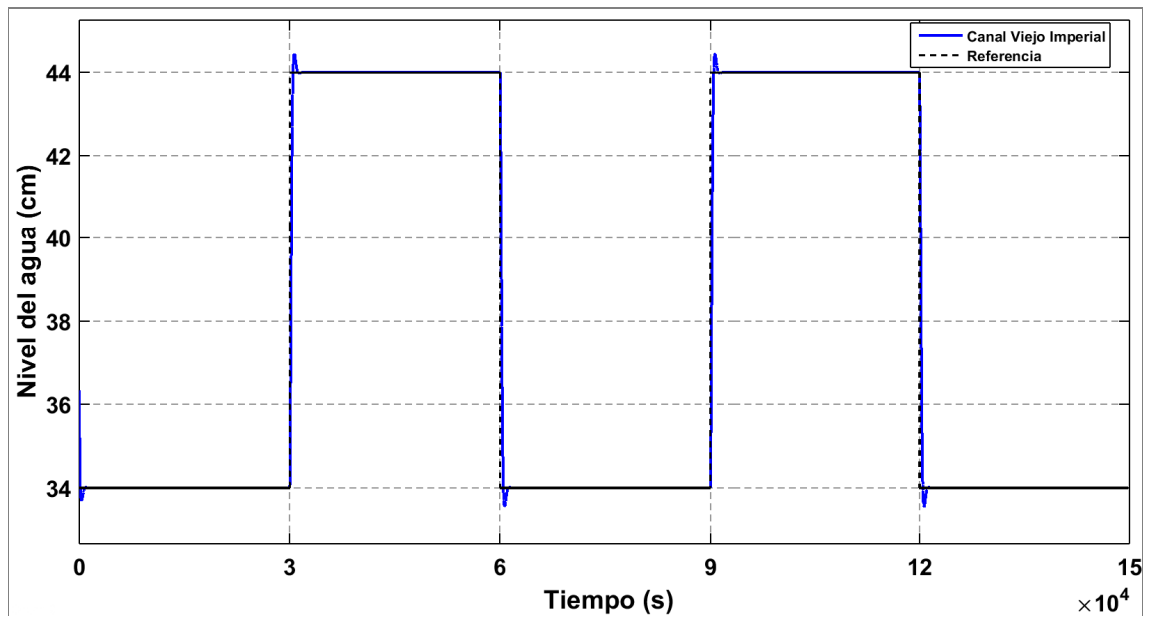


Figura 71: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

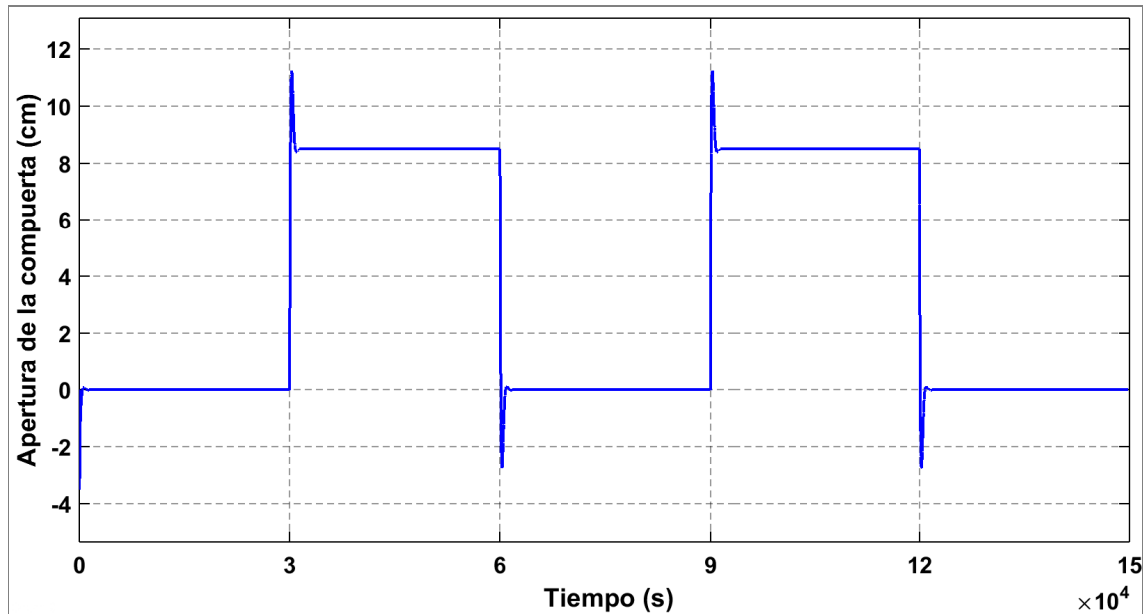


Figura 72: Resultados de simulación de la señal de control del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

En las Fig. 73, Fig. 74, Fig. 75 y Fig. 76 se muestran los resultados de simulación del sistema de control considerando el efecto de diferentes magnitudes de ruido.

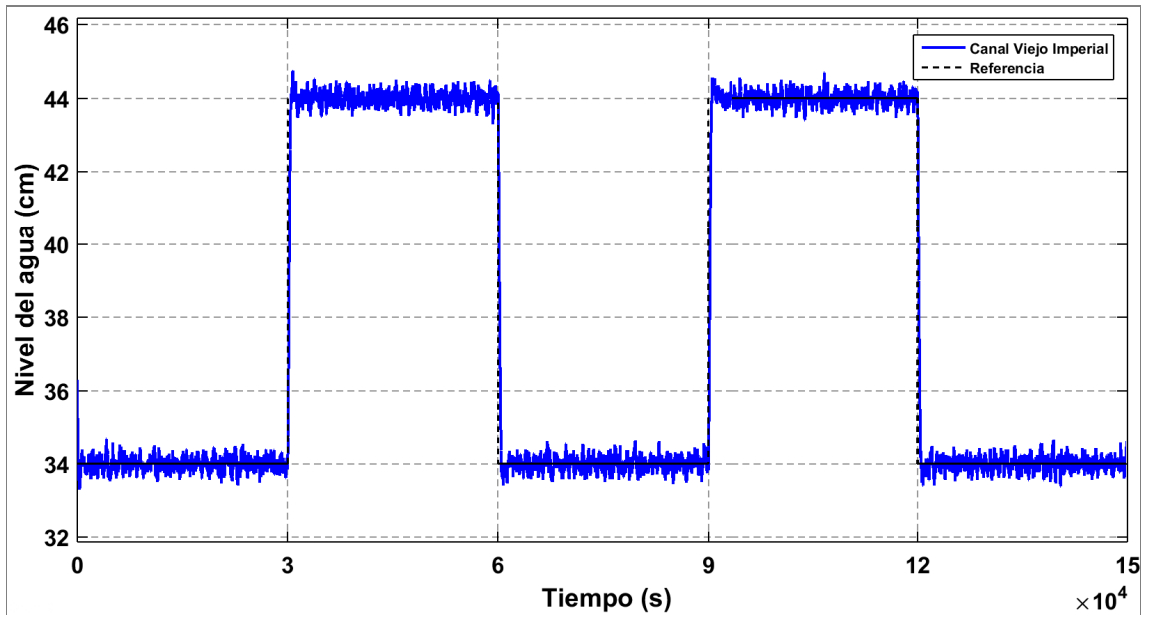


Figura 73: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 0.01.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

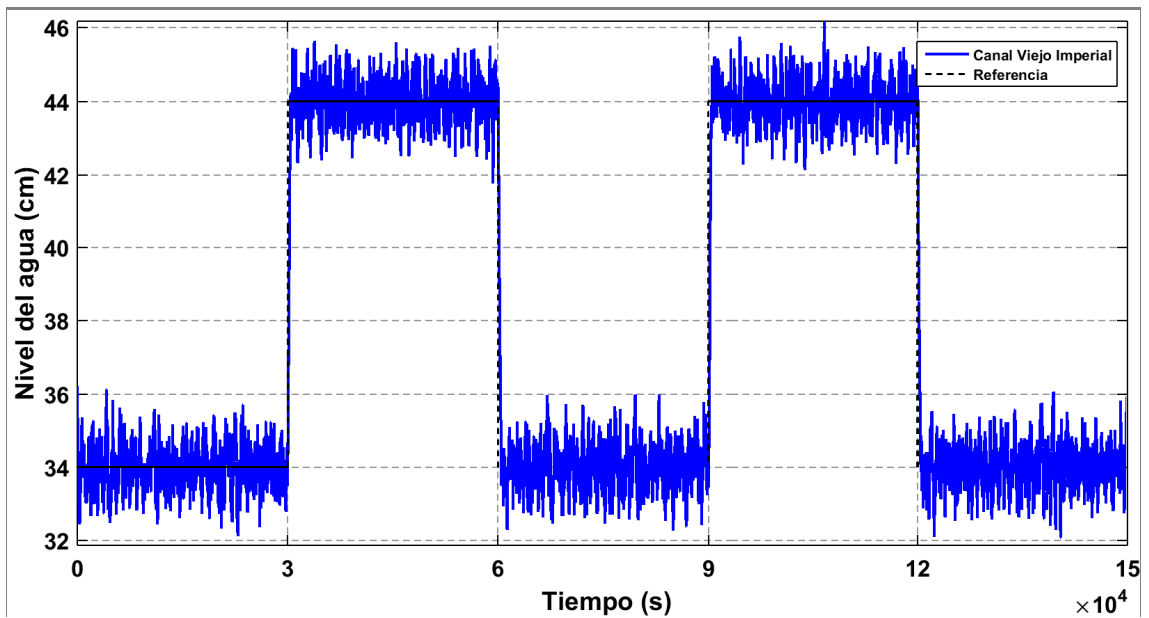


Figura 74: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 0.1.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

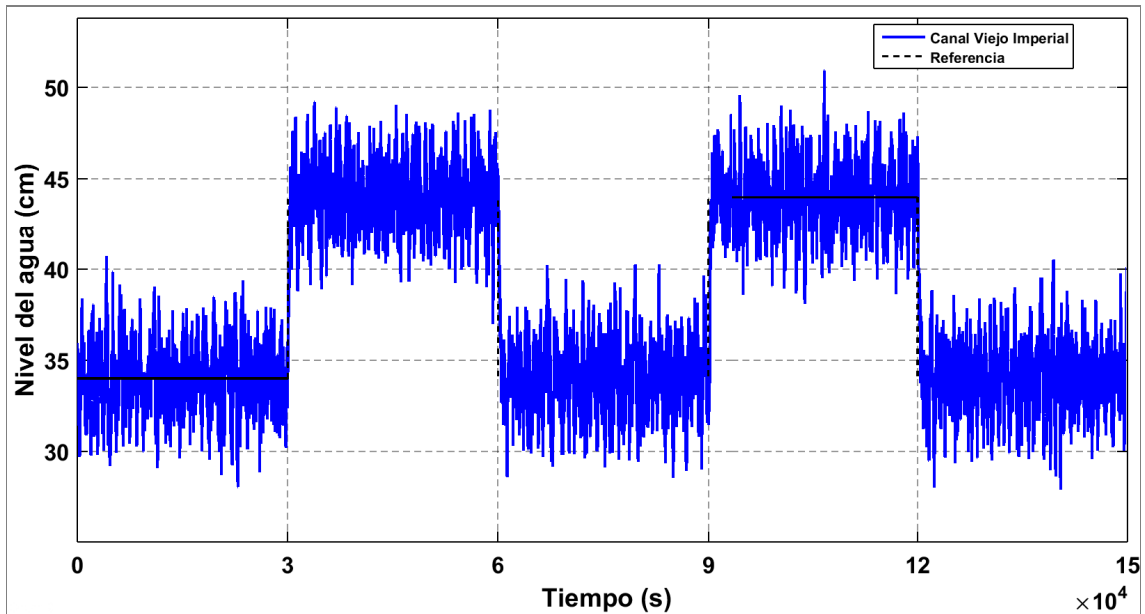


Figura 75: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 1.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

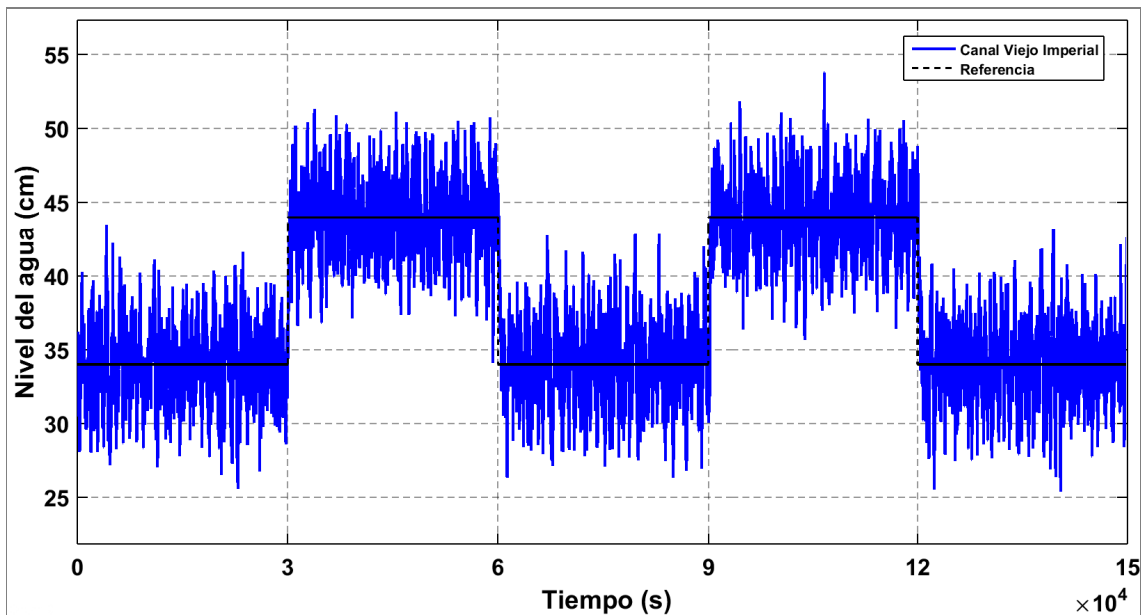


Figura 76: Resultados de simulación de la salida del sistema con $\alpha = 0.9$ y $\lambda(j) = 10$ y señal de ruido con varianza de 2.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

De los resultados mostrados se puede apreciar, que el controlador GPC desarrollado no se comporta de forma adecuada frente a perturbaciones con diferentes niveles de varianza. Se desarrolló una prueba de simulación con referencia externa variable. La señal de referencia externa variable se generó por medio de un bloque generador de secuencias escalón de Simulink. El comportamiento de la salida y de la señal de control del sistema se muestran en las Fig. 77 y Fig. 78.

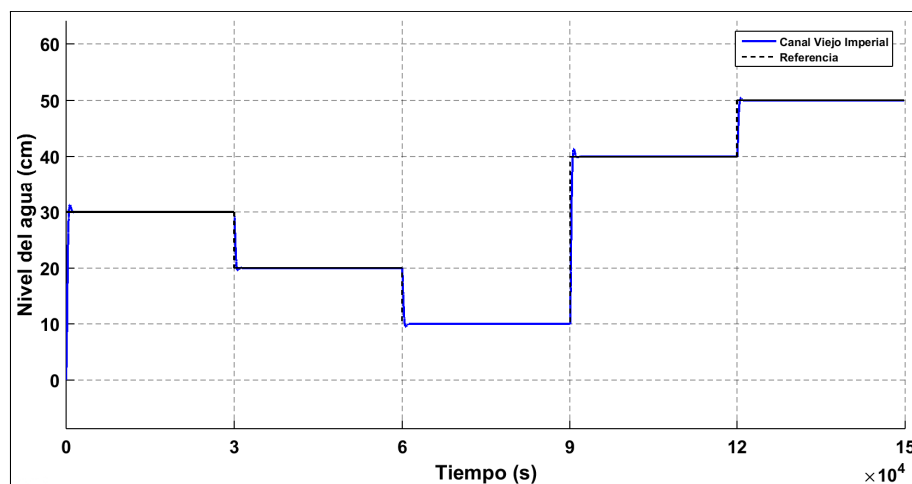


Figura 77: Resultados de simulación de la salida del sistema de control frente a una referencia externa variable.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

De los resultados obtenidos se puede apreciar que la salida del sistema de control sigue de forma adecuada a la señal de referencia externa variable, lo cual demuestra la efectividad del controlador GPC diseñado.

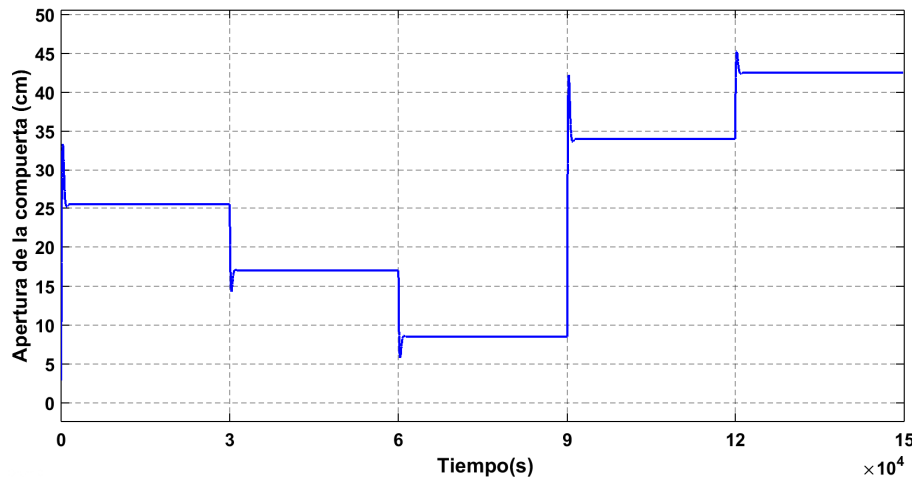


Figura 78: Resultados de simulación de la señal de control del sistema frente a una referencia externa variable.

Fuente: (UNAC-2019) Elaboración propia

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Luego de realizar el diseño de simulaciones del sistema de control predictivo generalizado se ha podido comprobar de forma experimental lo siguiente

La hipótesis general propuesta en esta investigación fue, desarrollando un sistema de control predictivo generalizado mejora la distribución de agua en el canal viejo imperial, se estudio las diversas dinámicas del canal de riego viejo imperial diseñando un sistema eficiente para la distribución de agua a la junta de regantes.

La hipótesis específica H1 propuesta en esta investigación fue, Mediante la técnica de identificación experimental se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de un tramo del canal viejo imperial, se copiaron los datos mediante un sensor de nivel de agua logrando obtener el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del canal viejo imperial en la compuerta 36, así como su función de transferencia. Los resultados de validación muestran que el modelo matemático presenta un índice de ajuste del 88,04 % considerado como un buen modelo matemático para ser usado en el diseño del control predictivo generalizado.

La hipótesis específica H2 propuesta en esta investigación fue, es posible diseñar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución del agua en el canal viejo imperial, con la función de transferencia obtenida se pudo diseñar y comparar la eficiencia y efectividad del sistema tradicional con el sistema de control predictivo generalizado y los resultados fueron favorables.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

La investigación desarrollada en esta tesis se ha podido contrastar con otros trabajos relacionado que aportan información para realizar una comparación y plantear nuevos métodos de control mejorando la distribución del agua.

Rivas Perez Raul y Feliu Batlle Vicente (2018), en su trabajo de investigación titulado “Identificación del primer tramo del canal principal de riego Imperial de Aragón”. Los resultados obtenidos en esta tesis coinciden con los resultados encontrados por Rivas (2008) en el sentido que la mejor estructura paramétrica que modela un canal de riego es el ARMAX [2 2 2].

Cuenca Tinitana Julio y Rivas Perez Raul, (2012), en su trabajo de investigación titulado “Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribución del agua en un tramo de un canal principal de riego”, en sus resultados obtenidos la salida del sistema de control sigue de forma adecuada a la señal de referencia externa variable lo cual esta de acuerdo con lo que se encontro en esta investigación.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Según la ley 30220, la Universidad Nacional del Callao, tiene como uno de sus principios la ética profesional como señala en su art. 5, asimismo tiene la responsabilidad Social Universitaria de presentada a todos sus alumnos la función de investigación, servicios de extensión, participación en el desarrollo nacional, gestión de impacto y sobre otras organizaciones públicas y privadas, como se puede ver en su art. 124. Este trabajo cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en los ítems mencionados.

CONCLUSIONES

Todos los objetivos propuestos en de nuestras investigación fueron cumplidos.

- Se desarrollo un estudio sobre el estado del arte de los canales de riego, donde se evidencio que en esta área aun existen problemas teóricos y prácticos sin resolver. entre ellos el problema de considerar el retardo del tiempo real y las perturbaciones que alteran el comportamiento dinámico del canal objeto de estudio.
- Utilizando las herramientas del software MATLAB se obtuvo un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico en una de las compuertas del canal viejo imperial, el cual se distingue por presentar estructura ARMAX, segundo orden y retardo de tiempo. como resultado se obtuvo un modelo matemático simple y discreto. la validación del sistema arrojó un índice de ajuste del 88,04 % por lo que se considera un modelo adecuado para ser utilizado en el diseño del sistema de control predictivo generalizado.
- Se diseño un sistema de control predictivo generalizado para el control de la compuerta del canal de riego, para lograr este objetivo se utilizaron algunas librerías de MATLAB. En la herramienta SIMULINK de MATLAB se implementaron los bloques (optimizador predictor, acumulador y modelo de canal) para la simulación del sistema diseñado obteniendo resultados óptimos

RECOMENDACIONES

- Ante la eminente escases y el deficiente funcionamiento del sistema de irrigación se recomienda a la comisión de regantes del canal viejo imperial implementar el sistema de control predictivo generalizado en todas sus compuertas y en los demás canales del río Cañete.
- Para mejorar la eficiencia del GPC en canal de riego viejo imperial se recomienda utilizar otros tipos de controladores.
- Debido a que el caudal del río Cañete es variable en las distintas estaciones del año, se recomienda a la comisión de regantes construir reservorios para almacenar agua, así el proceso de automatización con el GPC sea más eficiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. A. Aguado. *Temas de identificación de sistemas y control adaptable*. Instituto de Cibernética, Matemática y Física, 2000.
- [2] Jean-Pierre Baume, Pierre-Olivier Malaterre, and Jacques Sau. Tuning of pi controllers for an irrigation canal using optimization tools. In *USCID Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems*, 1999.
- [3] Petra Bernhoff. System identification and control of an irrigation channel with a tunnel, 2008.
- [4] Yolanda Bolea, Vicenç Puig, and Joaquim Blesa. Gain-scheduled smith pid controllers for lpv systems with time varying delay: application to an open-flow canal. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):14564–14569, 2008.
- [5] Charles M Burt and Xianshu Piao. Advances in plc-based irrigation canal automation. *Irrigation and drainage*, 53(1):29–37, 2004.
- [6] Eduardo F Camacho and Carlos Bordons Alba. *Model predictive control*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [7] EF Camacho and C Bordons. Model predictive control springer, 1999.
- [8] David W Clarke, Coorous Mohtadi, and PS Tuffs. Generalized predictive control—part i. the basic algorithm. *Automatica*, 23(2):137–148, 1987.
- [9] AJ Clemmens and BT Wahlin. Simple optimal downstream feedback canal controllers: Asce test case results. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(1):35–46, 2004.
- [10] Jean-Michel Coron, Brigitte d’Andrea Novel, and G Bastia. A lyapunov approach to control irrigation canals modeled by saint-venant equations. In *Control Conference (ECC), 1999 European*, pages 3178–3183. IEEE, 1999.

- [11] TJ Cuenca. Desarrollo de un sistema de control predictivo generalizado (gpc) de la distribución de agua en el vi tramo del canal principal de riego güira de melena. *Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría*, 2011.
- [12] Jean F Dulhoste, Didier Georges, Gildas Besançon, and Carlos J Jerez. Comparación de controladores de nivel para canales abiertos basados en un modelo por colocación. *Información tecnológica*, 18(6):13–18, 2007.
- [13] Omer F Durdu. Optimal control of irrigation canals using recurrent dynamic neural network (rdnn). In *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, pages 1–12. 2004.
- [14] Karin Eurén and Erik Weyer. System identification of open water channels with undershot and overshot gates. *Control Engineering Practice*, 15(7):813–824, 2007.
- [15] V Feliu-Batlle, R Rivas Perez, and L Sanchez Rodriguez. Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters. *Control engineering practice*, 15(6):673–686, 2007.
- [16] V Feliu-Batlle, R Rivas-Perez, L Sanchez-Rodriguez, and MA Ruiz-Torija. Robust fractional-order pi controller implemented on a laboratory hydraulic canal. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(4):271–282, 2009.
- [17] Juan Pablo González and Nicolas Toro García. Análisis energético del control y el error a sistemas linealizados implementando gpc y dmc. *Scientia et technica*, 1(35), 2007.
- [18] Cristian Kunusch. Identificaciïin de sistemas dinêmicos. *Universidad Nacional de la Plata, Cátedra de control y servomecanismos*, page 39, 2003.

- [19] Yuping Li and Michael Cantoni. Distributed controller design for open water channels. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):10033–10038, 2008.
- [20] X Litrico and V Fromion. Design of structured multivariable controllers for irrigation canals. In *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05. 44th IEEE Conference on*, pages 1881–1886. IEEE, 2005.
- [21] X Litrico, V Fromion, and J-P Baume. Tuning of robust distant downstream pi controllers for an irrigation canal pool. ii: Implementation issues. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(4):359–368, 2006b.
- [22] X Litrico, P-O Malaterre, J-P Baume, P-Y Vion, and J Ribot-Bruno. Automatic tuning of pi controllers for an irrigation canal pool. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1):27–37, 2007.
- [23] Xavier Litrico. Robust imc flow control of simo dam-river open-channel systems. *IEEE Transactions on control systems technology*, 10(3):432–437, 2002.
- [24] Xavier Litrico and Vincent Fromion. Simplified modeling of irrigation canals for controller design. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(5):373–383, 2004.
- [25] Xavier Litrico and Vincent Fromion. H/sub/spl infin//control of an irrigation canal pool with a mixed control politics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(1):99–111, 2006.
- [26] Xavier Litrico and Vincent Fromion. *Modeling and control of hydrosystems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [27] Xavier Litrico, Didier Georges, and J-L Trouvat. Modelling and robust control

- of a dam-river system. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3862–3867. IEEE, 1998.
- [28] L. Ljung. *System identification: Theory for the user*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2000.
- [29] L Ljung. System identification toolbox 7 user's guide (natick, ma: Mathworks inc.). 2007.
- [30] J Maciejowski. Model predictive control with constrains. 2001.
- [31] P-O Malaterre and J-P Baume. Modeling and regulation of irrigation canals: existing applications and ongoing researches. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3850–3855. IEEE, 1998.
- [32] Pierre-Olivier Malaterre. Control of irrigation canals: why and how. In *International Workshop on Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources, Marroco*, pages 271–292. Citeseer, 2007.
- [33] Pierre-Olivier Malaterre and J Rodellar. Multivariable predictive control of irrigation canals. design and evaluation on a 2-pool model. In *International Workshop on Regulation of Irrigation Canals, Marroco*, pages 230–238. Citeseer, 1997.
- [34] YP Mathur, Gunwant Sharma, and AW Pawde. Optimal operation scheduling of irrigation canals using genetic algorithm. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6):11, 2009.
- [35] Ján Mikleš and Miroslav Fikar. Process modelling, identification, and control. 2007.

- [36] J. Moreno. Estimación de parámetros en controladores de sistemas de excitación utilizando un método de identificación. Master's thesis, Instituto Politécnico Nacional, Mexico, 2010.
- [37] Su Ki Ooi and Erik Weyer. Control design for an irrigation channel from physical data. *Control Engineering Practice*, 16(9):1132–1150, 2008.
- [38] R Rivas Perez, V Feliu Batlle, and L Sanchez Rodriguez. Robust system identification of an irrigation main canal. *Advances in Water Resources*, 30(8):1785–1796, 2007.
- [39] Raúl Rivas Pérez, Vicente Feliu Batlle, Luis Sánchez Rodríguez, Diego J Pedregal Tercero, Antonio Linares Sáez, José Vicente Aguilar Mariñosa, and Pedro Langarita García. Identificación del primer tramo del canal principal de riego imperial de aragón". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 23(1):71–87, 2008.
- [40] KH Plarre, AM Rojas, and RA Rojas. Analytical solution to the polynomial diophantine equation: Development and application to generalised predictive control analysis. 1998.
- [41] D Rodriguez and C Bordons. Apuntes de ingeniería de control, 2005.
- [42] VM Rutz, C Ruiz, and L Ramirez. Predictive control in irrigation canal operation. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3897–3901. IEEE, 1998.
- [43] Jan Schuurmans. *Control of water levels in open-channels*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 1997.
- [44] Carla Seatzu, Alessandro Giua, and Giampaolo Usai. Decentralized volume control of open-channels using h_2 norm minimization. In *SMC'98*

Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 98CH36218), volume 4, pages 3891–3896. IEEE, 1998.

- [45] Robbert Wagemaker. *Model predictive control on irrigation canals, application of various internal models*. PhD thesis, Master's thesis, Faculty of Information Technology and Systems, Delft . . . , 2005.
- [46] Erik Weyer. System identification of an open water channel. *Control engineering practice*, 9(12):1289–1299, 2001.

ANEXOS

A. Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA			
Título del proyecto: "MODELAMIENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL CANAL PRINCIPAL DEL VALLE DE CAÑETE"			
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables
<p>Problema general ¿Cómo diseñamos un sistema de control automático que permita la regulación de las compuertas de regadío de la zona agraria del valle de Cañete?</p>	<p>Objetivos general Diseñar un sistema de control automático, en la zona agraria del valle de Cañete, para mejorar la distribución del agua en el sector agrícola.</p>	<p>Hipótesis general Desarrollando un sistema de control predictivo generalizado mejoramos la distribución de agua en el canal viejo imperial.</p>	<p>Variables independientes Variable X: Modelamiento de un sistema de control predictivo generalizado. Variables dependientes Variable Y: Distribución del agua en el canal principal del valle de Cañete</p>
<p>Problema específico ¿Cuál es el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico del canal viejo imperial?</p>	<p>Objetivos específicos Obtener mediante la técnica de identificación experimental de sistemas, un modelo matemático que describa de forma adecuada el comportamiento dinámico de un tramo del canal viejo imperial.</p>	<p>Hipótesis específicas Mediante la técnica de identificación experimental se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de un tramo del canal viejo imperial.</p>	<p>La investigación es teórica experimental, y tiene como propósito aplicar el uso del conocimiento científico para llegar a solucionar la demanda de los regantes del curso hídrico. Este proyecto de investigación se basa en desarrollar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución de agua en el valle de Cañete, con la finalidad de mejorar la distribución de agua de mandada por los regantes de la zona.</p>
<p>¿Cómo diseñar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución de agua en el canal viejo imperial?</p>	<p>Diseñar y analizar un sistema de control predictivo generalizado para la distribución de agua en el canal viejo imperial</p>	<p>Es posible diseñar un sistema de control predictivo generalizado Para la distribución del agua en el canal viejo imperial.</p>	

B. Sensor de ultra sonido UK1D/E2-0EUL



Especificaciones Técnicas:

Rango de Detección: 200 mm a 1600 mm

Angulo del haz: +/- 7°

Precision repetida: 0.5

Histéresis: 1

Error de Linealidad: 1 %

Compensación de Temperatura: Si

Señal de Salida: 0 a 10 V

Rango de Temperatura: -20°C a +60°C

Voltaje de alimentación: 15 a 30 VDC

Material de la Carcasa: Acero Inoxidable 316L

Alojamiento: Cilíndrico M18

Longitud o profundidad del sensor: 91mm

Tipo de conexión: Enchufe M12 de 5 pines

Grado de Protección: IP68

Protección contra polaridad inversa y transitorios

Ajuste de Set Point: Boton con función Teach-in

C. Módulo de adquisición de datos Advantech ADAM-4017+-CE



Especificaciones Tecnicas:

Entrada Universal

4 Canales

Resolucion: 16 bits

Rango y Tipo de Entrada

-Entrada Analogica:

+/-150mV, +/-500mV, +/-1V, +/-5V, +/-10V

0-150mV, 0-500mV, 0-1V, 0-5V, 0-10V

0-20mA, 4-20mA, +/-20mA

-Entrada Digital (Contacto Seco): 0-Abierto, 1-Cerrado

Proteccion contra Sobre-voltaje: +/-35VDC

Salida Digital:

2 Canales (Colector abierto a 30V, 400 mA max. para resistencia de carga)

Aislamiento: 3,000 Vrms

Soporta salida de pulsos de 5 KHz

General:

WLAN: IEEE 802.11 b/g/n 2.4 Ghz

Rango Exteriores: 110 m con linea de vista

Conectores: bornera extraible con tornillos

Certificacion: CE, FCC, R&TTE, NCC, SRRRC, RoHS, KC

Dimensiones: 80 x 148 x 25 mm

Carcasa: PC

Montaje: Riel DIN, Pared

Alimentacion: 10-30VDC

Proteccion contra alimentacion inversa

Soporta Protocolos Modbus/TCP, TCP/IP, UDP, DHCP y HTTP

Los ADAM 4017/4018 son módulos de 16 bits que disponen de 8 canales cada uno. Disponen de varios rangos de entrada programables. Las entradas proporcionan un optoaislamiento de 3000 VdC entre las entradas analógicas y el módulo, protegiendo al módulo y periféricos de daños provenientes de altos voltajes en las entradas.

Estos módulos permiten acondicionamiento de señal, conversión A/D, rangos variables y comunicación digital via RS-485. El módulo protege al equipamiento de bucles de masa y alteraciones en la alimentación gracias a su optoaislamiento

de la entrada A/D y un transformador de aislamiento de hasta 3000 VdC.

Para realizar la conversión A/D usan un convertidor sigma-delta controlado por un microprocesador de 16 bits. Los datos digitales se trasladan después a unidades de ingeniería. A petición del ordenador, el módulo le envía el dato a través de la interfase RS-485.

D. Convertidor de interfaz USB a RS485



Especificaciones Tecnicas:

Revisión de la especificación USB 1.1 y 2.0 compatible. Admite interfaz serie RS485 / RS422. No se necesita fuente de alimentación externa. Admite Windows98 / SE / ME / 2000 / XP.

E. Análisis de datos en Matlab

Estimación de los parámetros del modelo dinámico

```
%Cargando los datos obtenidos de las pruebas
experimentales con señal SBSA
Ts=10; %segundos
%Estableciendo propiedades de los datos
canal = iddata (y, ui, Ts);
%ui: Apertura de compuerta
%y: Nivel aguas abajo
%Ts: segundos'
%Graficando los datos experimentales del canal viejo
imperial
figure (1);
plot (canal);
%Seleccionando el intervalo de datos para la estimación
Xe = canal (70:2000);
%Graficando los datos para la estimación
figure (2);
plot (Xe);
%Eliminando imperfecciones de los datos para
estimación
ze = detrend (Xe);
%Estructuras a ser probadas para el modelo de orden 1,
2, 3 y 4
modelo1 = arx (Xe, [2 2 1]); % ARX
modelo2 = armax (Xe, [2 2 2 1]);% ARMAX
modelo3 = oe (Xe, [2 2 1]);% OE
%Seleccionando datos para la validación
Xv = canal (2000:3620);
%Eliminando imperfecciones de los datos de validación
Xv = detrend (Xv);
%Validación cruzada
figure (4);
compare (Xv, modelo1, modelo2, modelo3);
xlabel ('Tiempo (s)', 'FontSize', 14)
ylabel ('Nivel del agua (cm)', 'FontSize', 14)

%Presentando los modelos obtenidos
present (modelo1)
present (modelo2)
present (modelo3)
%Respuesta al paso del modelo
figure (5)
step (modelo2, 0:10:3620)
xlabel ('Tiempo (s)', 'FontSize', 14)
ylabel ('Nivel del agua (cm)', 'FontSize', 14)
%Respuesta la impulso del modelo
figure (6)
impulse (modelo2, 1000)
xlabel ('Tiempo (s)', 'FontSize', 14)
ylabel ('Nivel del agua (cm)', 'FontSize', 14)
%Residuos del modelo
figure (7)
resid (modelo2, zv)
%Polos y ceros del modelo
figure (8)
iopzplot(modelo2, 'sd', 3, 'axis', 1)
%se hizo el cambio de ---->
%iopzplot por iopzmap con pzmap
title ('Ubicación de polos y ceros');
xlabel ('Real');
ylabel ('Imaginario')
%Diagrama de Bode del modelo
figure (9)
bode (modelo2)
%Modelo continuo del sistema
modeloc = d2c (modelo2, 'zoh');
figure (10)
%Respuesta al paso del modelo continuo
step (modeloc, 3620)
%Presentando el modelo continuo
present (modeloc)
```

Estimación de las matrices para el GPC

```

%Polinomios del Sistema ARMAX [2 2
2 1] A(q^-1), B(q^-1) y C(q^-1)
A = [1 -1.663 0.674];
B = [0 0.068862 -0.05568];
C = [1 -1.247 0.5208];
%Cálculo de los grados de los
polinomios
[Afil, Acol] = size (A);
dA = Acol-1;
[Bfil, Bcol] = size (B);
dB = Bcol-1;
[Cfil, Ccol] = size (C);
dC = Ccol-1;
%Retardo de tiempo del sistema
d = 1; % Instantes de muestreo
%Tiempo de muestreo en segundos
T = 10;
%Horizontes de predicción y control
Nu = 10; %Horizonte de control
N = Nu;
N1 = d+1; %Horizonte de predicción
N2 = d+N; %Horizonte de predicción
%Cálculo del polinomio Agorro
delta = [1 -1]; %polinomio
Agorro = conv (A, delta);
%Cálculo del grado del polinomio
Agorro
[AgoFil, AgoCol]= size (Agorro);
degAgorro = AgoCol-1;
%Parámetros de sintonización
alfa = 0.96;
lambda = 1.5;
%Iniciando las matrices

e = [];
Ej = [];
Fj = [];
gaux = [];
Ges = [];
Gesprima = [];
%Iniciando contadores
cont = 1;
aux=0;
%Cálculo de E1 y F1 necesarios para
la solución recursiva
E1 = C (1);
R = [C zeros(1,degAgorro-dC)];
F1 = R- Agorro;
F1 (:, 1) = [];
[F1Fil, F1Col] = size (F1);
deltaF1 =F1Col+1;
%Iniciación de las matrices para
almacenar Ej y Fj
em = [E1 zeros(1,N-1)];
Fj = [Fj;F1];
Ej = [Ej em];
%Cálculo de los valores de los nuevos
términos de Ej y Fj
for j = (N1+1):N2
cont = cont+1;
f1 = F1 (1,1);
e = [E1(1, 1:cont-1) f1 zeros(1, N -
cont)];
Ej = [Ej; e]; %actualizando la matriz Ej
fj = [];
%Cálculo de los valores f j+1, i
for i=1:dA+1

%Haciendo el término F1 (nf+1)=0
F1 (deltaF1) = 0;
faux = F1(i+1)-F1(1)*Agorro(i+1);
fj = [fj faux]; %Actualizando la matriz fj
end
E1= Ej (cont, 1:N);
F1= [fj];
Fj = [Fj; F1]; %Actualizando la matriz Fj
end
% Cálculo de G y Gprima
for i=N1:N2
aux = aux+1;
Auxi1= Ej (aux, :);
Auxi2 = conv (B, Auxi1);
[Gji, Gprij] = deconv (Auxi2, C);
Ges = [Ges; Gji];
Gesprima = [Gesprima; Gprij];
end
gi = diag (Ges);
Ge = zeros(N, N);
Gesprima (:, [1:N])=[];
for i=1:N
Gji = diag ([gi(i)*ones(1, N-i+1)], 1-i);
Ge = Ge + Gji; %Actualizando la matriz
G
Gesprima (i, N) = [0];
end
%Cálculos necesarios para la
obtención de la ley de control
K = (inv
(((Ge')*Ge)+lambda*eye(N)))*(Ge');
Kprima = [1 zeros(1,N-1)]*K;

```

Trayectoria de referencia

```
function [w1,w2,w3,w4,w5,w6,w7,w8,w9,w10] = trayref(E)
%Función para determinar la trayectoria de referencia externa para el GPC
F =E';
%Parámetros y variables de entrada
wprima = F(1);
ref = F(2);
N = F(3);
alfa = F(4);
w1=alfa*wprima + ((1-alfa)*ref);
w2=alfa*w1 + ((1-alfa)*ref);
w3=alfa*w2 + ((1-alfa)*ref);
w4=alfa*w3 + ((1-alfa)*ref);
w5=alfa*w4 + ((1-alfa)*ref);
w6=alfa*w5 + ((1-alfa)*ref);
w7=alfa*w6 + ((1-alfa)*ref);
w8=alfa*w7 + ((1-alfa)*ref);
w9=alfa*w8 + ((1-alfa)*ref);
w10=alfa*w9 + ((1-alfa)*ref);
end
```